



**Hochschule
Bonn-Rhein-Sieg**
University of Applied Sciences



**Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt**

Fachbereich Elektrotechnik, Maschinenbau
und Technikjournalismus (EMT)
Studiengang „Maschinenbau“ (B.Eng.)

Bachelorarbeit

Aufbau und Betrieb eines Teststandes zur solaren Methanreformierung

Vorgelegt von:

René Rieping

An den Ellmen 11

53773 Hennef

Tel. 02242/7678

rene.rieping@smail.emt.h-brs.de

Matr.-Nr. 9018173

Erstgutachter:

Prof. Dr.-Ing. Klaus Wetteborn

Zweitgutachter:

Prof. Dr.-Ing. Dieter Franke

Betreuer am DLR:

Dr.-Ing. Matthias Lange

Sankt Augustin, 24.März 2015

Danksagung

Mit der vorliegenden Arbeit geht mein Bachelorstudium Maschinenbau an der Hochschule Bonn-Rhein-Sieg zu Ende. Ich möchte mir daher an dieser Stelle die Zeit für ein paar Worte des Dankes nehmen.

Ich danke an dieser Stelle Dr. rer.nat. Martin Roeb und Dr.-Ing. Matthias Lange für die Bereitstellung des Themas. Bei Prof. Dr.-Ing. Klaus Wetteborn und Prof. Dr.-Ing. Dieter Franke bedanke ich mich für die umfassende Betreuung seitens der Hochschule Bonn-Rhein-Sieg.

Bedanken möchte ich mich besonders bei Dr.-Ing. Matthias Lange und Dr.-Ing. Justin Lapp für die guten Zusammenarbeit im Projekt ContiSol. Sie haben mir bei offenen Fragen gerne weitergeholfen und mich mit Ihrem fundierten Wissen im Bereich der Solaren Verfahrenstechnik hervorragend unterstützt. Lamark de Oliveira und Dipl.-Chem. Marion Senholdt danke ich für die Bereitstellung der Chemikalien und Betriebsmittel, sowie der hilfreichen Unterstützung im Labor und im Bereich der Gasanalytik. Dank gilt auch B. Sc. Stefan Breuer und Dr.-Ing. Jan-Peter Säck für die Unterstützung im Bereich der Mess- und Regelungstechnik.

Ganz besonderer Dank gilt natürlich meinen Eltern, die mich zu einem Studium ermuntert und dieses überhaupt ermöglicht haben. Herzlich bedanken möchte ich mich auch bei meinem Bruder Christian und meiner Schwägerin Gabi, für das Gegenlesen dieser Arbeit und die Unterstützung während meiner Studienzeit.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung.....	I
Inhaltsverzeichnis	II
Liste der verwendeten Symbole	V
Kurzfassung	VII
1 Einleitung	1
1.1 Motivation der Arbeit.....	1
1.2 Das Projekt ContiSol	2
1.3 Ziel dieser Bachelorarbeit	3
2 Stand der Technik.....	4
2.1 Konzentrierende Solartechnik.....	4
2.1.1 Solarturmtechnologie	6
2.1.2 Receiver	7
2.2 Siliziumcarbid (SiC)	8
2.3 Xenon-Hochleistungsstrahler	8
2.4 Reformierung von Methan	9
2.5 Katalysatoren für die Methanreformierung	10
3 Der ContiSol Teststand.....	12
3.1 Aufbau des Teststands	12
3.2 Gasversorgung	14
3.3 Abschätzung der Druckverluste und Rohrleitungsdurchmesser	15
3.4 Gaserhitzer für den Methanstrom	16
3.5 Receiver-Reaktor	17
3.6 Absorber.....	20
3.7 Thermoelemente zur Temperaturerfassung.....	22
3.8 Gaskühler	23

3.9	Gaschromatograph (GC).....	24
3.10	Gaserhitzer für den Luftstrom	25
3.11	Durchflussmesser	26
3.12	Drucksensor	27
3.13	Verwendete Chemikalien.....	28
4	Kommunikation und Erfassung der Mess- und Regelungstechnik im Teststand	29
4.1	Grundlagen zu den verwendeten Komponenten.....	29
4.2	Erfassung und Verarbeitung der Messwerte der Thermoelemente	30
4.3	Verarbeitung der Daten aus den Druckmessungen.....	34
4.4	Verarbeitung der Daten der Durchflussmessung.....	35
4.5	Kommunikation mit den Volumenstromreglern.....	36
4.6	Anschluss des Verdampfers.....	37
4.7	Berechnung des thermischen Wirkungsgrades	38
4.8	Speicherung der erfassten Daten des ContiSol Teststandes	40
5	Abschätzung der Messungenauigkeit im Teststand	41
5.1	Messungenauigkeit der Temperaturerfassung	41
5.2	Messungenauigkeit der Druckerfassung	42
5.3	Messungenauigkeit des Durchflussmessers.....	43
5.4	Fehlerfortpflanzung des thermischen Wirkungsgrades.....	45
6	Kalibrierung der Messgeräte und Vorversuche	47
6.1	Kalibrierung des Gaschromatographen (GC)	47
6.2	Kalibrierung der Volumenstromregler	47
6.3	Vorversuche Gaserhitzer Methanstrom.....	48
7	Inbetriebnahme und Ausarbeitung der ersten Versuchskampagne des Teststandes..	54
7.1	Inbetriebnahme des Teststandes	54
7.2	Erstellung des Testplans für die erste Testkampagne	56
8	Zusammenfassung	60
9	Ausblick.....	62
	Literaturverzeichnis	63

Anhang	66
Anhang A. Berechnung des Wirkungsgrades und Betrachtung des Fehlers.....	66
Anhang B. Teilversuche der ersten Testkampagne	68
Erklärung zur Bachelor-Thesis.....	71

Liste der verwendeten Symbole

Formelzeichen

Abkürzung		Maßeinheit
A	Fläche	(mm ²)
C_p	Spezifische Wärmekapazität	(kJ/kgK)
d_i	Innendurchmesser	(m)
GKF	Gaskorrekturfaktor	(-)
g	Fallbeschleunigung	(m/s ²)
ΔH	Bildungsenthalpie	(kJ/mol)
h	Höhe	(m)
I	Stromstärke	(mA)
l	Länge der Rohrleitung	(m)
l_A	Länge des Absorberabschnitts	(mm)
M	Molare Masse	(kg/mol)
\dot{m}	Massenstrom	(kg/s)
p	Druck	(Pa)
p_n	Normdichte	(kg/m ³)
R	Widerstand	(kgm ² /A ² s ³)
Re	Reynoldszahl	(-)
R_M	Molare Gaskonstante	(J/molK)
s	Molekülstrukturfaktor	(-)
T	Temperatur	(K)
$\varnothing T_{Abs.}$	Durchschnittstemperatur Absorberabschnitt	(K)
\dot{V}	Volumenstrom	(m ³ /s)
$V_{Abs.}$	Volumenabsorber	(mm ²)
v	Strömungsgeschwindigkeit	(m/s)
ν_i	Kinematische Viskosität	(m ² /s)
ε	Emissionsgrad	(-)
λ	Rohrreibungszahl	(-)
ξ	Rohrwiderstandszahl	(-)
π	Kreiszahl	(-)
ϱ	Dichte des Mediums	(kg/m ³)
σ	Messunsicherheit	(-)
σ	Stefan-Boltzmann-Konstante	(W/(m ² K ²))
Δ	Differenz	(-)

Chemische Verbindungen

Ar	Argon
Al ₂ O ₃	Aluminiumoxid
LPSSiC	Flüssigphasen gesintertes Siliziumcarbid
SiSiC	Gesintertes Siliziumcarbid
He	Helium
CO ₂	Kohlendioxid
CO	Kohlenmonoxid
C	Kohlenstoff
CH ₄	Methan
NSiC	Nitridgebundenen Siliziumcarbid
Ni	Nickel
Pt	Platin
RSiC	Rekristallisiertes Siliziumcarbid
Rh	Rhodium
Ru	Ruthenium
O ₂	Sauerstoff
H ₂ O	Wasser
H ₂ O	Wasserstoff

Abkürzungen

APTL	Aerosol and Particle Technology Laboratory
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DoE	Design of Experiment
FATMES	Flux and Temperature Measurement System
GC	Gaschromatograph
GUM	Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement
HLS	Hochleistungsstrahler
LabVIEW	Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit widmet sich dem Aufbau und Betrieb eines Teststandes zur kontinuierlichen solaren Methanreformierung. Für den Teststand, der in einem Hochleistungsstrahler aufgebaut wird, werden Verfahrenskomponenten sowie Mess- und Regelungstechniken ausgewählt, platziert und ein Regelungskonzept erstellt. Mit dem Programm LabVIEW werden die erfassten Mess- und Regelungsgrößen grafisch angezeigt, gespeichert und eine vorläufige Bestimmung der Prozessgüte durchgeführt. Um die Qualität der Messergebnisse zu steigern, wird die Messunsicherheit der verwendeten Messtechnik berechnet. Für die solare Methanreformierung wird ein Absorber mit neuartiger Zweikanalstruktur in einen bereits bestehenden Receiver integriert. In der einen Hälfte der Kanalstruktur findet die Methanreformierungsreaktion statt. In den restlichen Kanälen kann ein Wärmeaustausch mit dem Medium Luft erfolgen, um einen Wärmespeicher zu beladen bzw. im Nachtbetrieb Wärme aus dem Speicher wieder in den Receiver einzukoppeln. Für die Inbetriebnahme werden Mess- und Regelungskomponenten kalibriert und ein Gaserhitzer für die Verwendung im Teststand entwickelt und optimiert. Weiterhin werden die Inbetriebnahme und Versuchspläne für die erste Testkampagne ausgearbeitet.

1 Einleitung

1.1 Motivation der Arbeit

Der Kampf gegen die globale Erwärmung und die damit verbundene Reduzierung des CO₂-Ausstoßes ist eine der großen Herausforderungen für Industrie und Forschung in diesem Jahrhundert. Der Weltenergiebedarf wird derzeit vor allem durch die Verbrennung der fossilen Energieträger Kohle, Gas und Öl gedeckt [1]. Ein zentrales Problem bei der Nutzung dieser Energieträger liegt darin, dass bei der Verbrennung fossiler Energie klimaschädliches CO₂ freigesetzt wird, welches die Erderwärmung beschleunigt.

Des Weiteren steht diese Energie nur endlich zur Verfügung. Aktuelle Prognosen gehen davon aus, dass bei gleichbleibendem Verbrauch die Reichweite für Erdöl 40 bis 50 Jahre und die Reichweite von Kohle noch etwa 200 Jahre beträgt [2]. Bei diesen Annahmen werden jedoch noch keine wachsende Weltbevölkerung und der steigende Energiebedarf von Schwellenländern berücksichtigt. Um langfristig den Energiebedarf der wachsenden Weltbevölkerung und das Ziel der CO₂-Reduzierung zu erreichen, wird daher verstärkt im Bereich der erneuerbaren Energien geforscht und investiert. Erneuerbare Energien sind Energiequellen, die nach menschlichem Maßstab unerschöpflich sind, wie die Sonnenenergie, geothermische Energie und die Planetenenergie. Besonders großes Potential besteht dabei in der Nutzung von Sonnenenergie, da sie die größte erneuerbare Energiequelle ist. In einem Jahr erreicht eine Energiemenge von $1,08 \times 10^{18}$ kWh in Form von Sonnenstrahlung die Erdoberfläche. Der gesamte jährliche Primärenergiebedarf der Erde beträgt etwa nur ein Zehntausendstel dieser Energiemenge [3].

Ein Kernproblem bei der Nutzung von Sonnenenergie ist jedoch die zeitliche und örtliche Einschränkung der Verfügbarkeit. Überdies stellen der Transport und die Speicherung der Energie Schwierigkeiten dar. Um diesen Problemen entgegenzuwirken, ist es notwendig, neue Speichermedien und Umwandlungsformen für Sonnenenergie zu finden.

Eine zukunftsfähige Lösung ist dabei die solarthermische Erzeugung von Brennstoffen [4] [5]. Durch die Umwandlung der solaren Energie in Brennstoff wird das Problem der zeitlichen und örtlichen Einschränkung der Verfügbarkeit von Sonnenenergie gelöst, da sich der erzeugte Brennstoff gut transportieren und lagern lässt. Ein möglicher Brennstoff, welcher in solarthermischen Prozessen hergestellt werden kann, ist energiereiches Synthesegas. Synthesegas kann bei Temperaturen zwischen 650-900 °C aus der Reformierung von Methan (CH₄), Kohlenstoffdioxid (CO₂) oder Wasserdampf (H₂O) erzeugt werden. Synthesegas ist ein wichtiges Grundprodukt in der chemischen Industrie und kann zur Herstellung von Methanol, Dimethylether und Fischer-Tropsch Diesel verwendet werden [6]. Derzeit wird die Reaktionswärme für die Herstellung von Synthesegas aus der Verbrennung fossiler Energieträger wie etwa Erdgas, welches CH₄ enthält, erzeugt. Dies hat den Nachteil, dass bis zu 25% des Erdgases für die Reaktionswärme verwendet werden und CO₂ frei gesetzt wird. Eine Alternative ist es, die Reaktionswärme durch die Nutzung von Sonnenenergie bereitzustellen. Durch diesen Weg werden die vorhandenen Ressourcen effizienter genutzt und es wird weniger CO₂ produziert. Des Weiteren kann bei der Herstellung von Synthesegasen

umweltschädliches CO_2 gebunden werden, welches als Abfallprodukt in Industrie- und Kraftwerksprozessen entsteht und somit die Belastung für die Umwelt weiter reduziert werden.

Um den Prozess der Synthesegasherstellung noch nachhaltiger zu gestalten, stellt die Nutzung von Sonnenenergie zur Erzeugung der benötigten Reaktionswärme nur einen ersten Teilschritt dar. Langfristig sollte die Methanquelle Erdgas, welche überwiegend zur Synthesegasherstellung verwendet wird [6], durch andere methanreiche Quellen ersetzt werden. Große Potentiale bieten dabei Gase aus Biogasanlagen oder Mülldeponien. Diese besitzen einen hohen Methangehalt und können aus nachwachsenden Rohstoffen oder vorhandenen Ressourcen produziert werden. In verschiedenen wissenschaftlichen Arbeiten, unter anderem von Vita et. al. [7] und Bereketidou et. al. [8], wurde bereits die Umsetzbarkeit dieser Möglichkeit bewiesen und näher untersucht.

1.2 Das Projekt ContiSol

ContiSol ist ein Kooperationsprojekt zwischen dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und dem griechischen Aerosol and Particle Technology Laboratory (APTL). Auf deutscher Seite wird das Projekt vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert. Inhalt des Projektes ist es, den konventionellen Prozess der Synthesegasherstellung zu einem solarthermischen Reformierungsprozess weiterzuentwickeln.

Ein wesentliches Kernelement in diesem Prozess bildet ein Solarreceiver mit einem keramischen Absorber (Abbildung 1.1), welcher konzentrierter Solarstrahlung ausgesetzt ist. Der Absorber hat eine neuartige Zweikanalstruktur, die aus einer klassischen Wabenstruktur hervorgegangen ist. Die eine Hälfte der Kanäle des Absorbers ist mit einem Katalysator beschichtet. Dort findet die thermochemische Reaktion zwischen CH_4 , CO_2 und H_2O zu Synthesegas statt und in der anderen Hälfte der Kanäle findet ein Wärmeaustausch mit dem Trägermedium Luft statt. So kann tagsüber während des solaren Betriebs der Prozess zur Synthesegasherstellung erfolgen und zeitgleich Luft auf hohe Temperaturen erhitzt werden die an einen thermischen Speicher abgegeben wird.

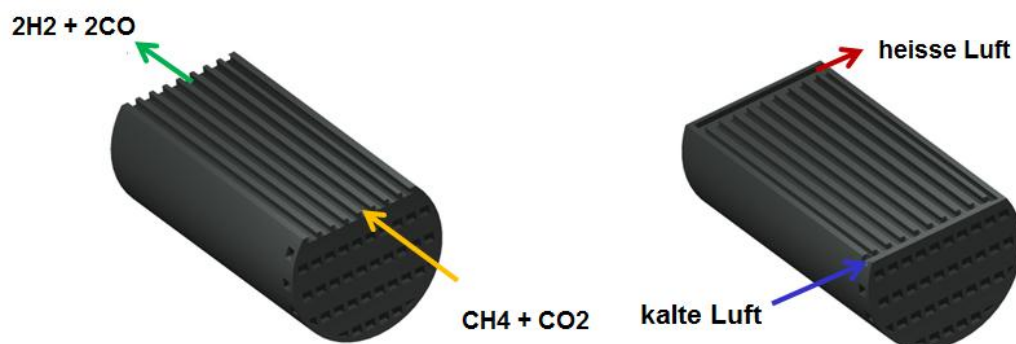


Abbildung 1.1 Kanalstruktur Absorber

Um den chemischen Prozess auch nachts oder bei geringer Solarstrahlung aufrecht zu erhalten, kann die erhitzte Luft aus dem Speicher zurück zum Receiver geführt werden, siehe

Abbildung 1.2. Dadurch wird die eine Hälfte der Kanäle, in welcher der chemische Prozess stattfindet, ausreichend für die Synthesegasherstellung erhitzt. Dies könnte einen wirtschaftlich vorteilhaften kontinuierlichen Betrieb ermöglichen. Eine detaillierte Wirtschaftlichkeitsanalyse wird zu einem späteren Zeitpunkt im Projekt Contisol durchgeführt.

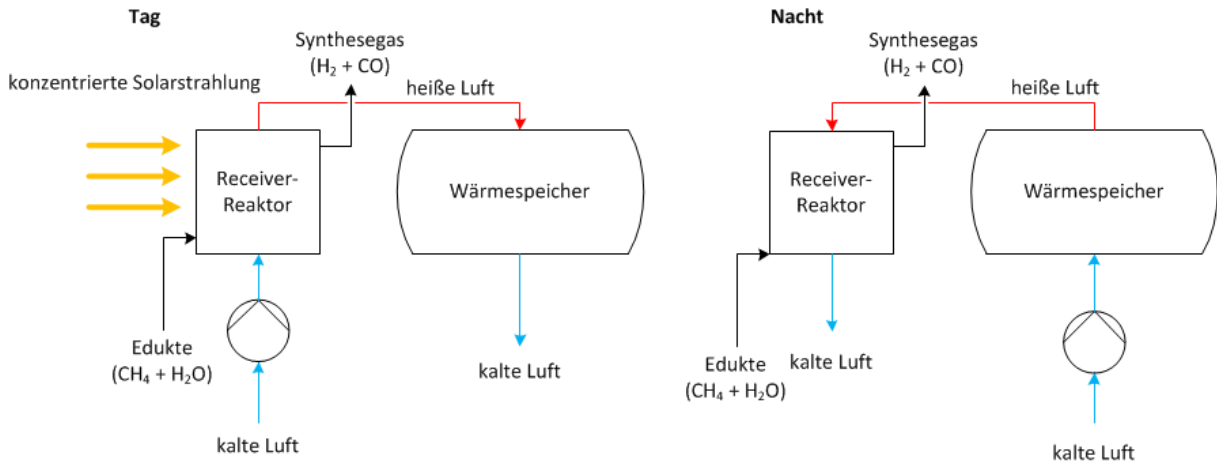


Abbildung 1.2 ContiSol im Tag-Nachtbetrieb

Zielsetzung für das DLR ist es, ein Reaktordesign zu entwickeln, in dem der neu entwickelte Absorber integriert werden kann. Des Weiteren soll gezeigt werden, dass der Prozess der Synthesegasproduktion auch mit der diskontinuierlichen Energiequelle Sonne und einem thermischen Energiespeicher fortlaufend erfolgen kann. Dazu wird ein Teststand mit Tag-Nacht-Rhythmensimulation entwickelt, der in den Hochleistungsstrahler am DLR Standort in Köln-Porz integriert wird. Außerdem enthält der Teststand verschiedenste Mess- und Auswertelektronik um das erzeugte Synthesegas, Volumenströme, Temperaturen und Drücke zu erfassen und zu analysieren.

Ein weiteres Ziel des Projektes ist es, gemeinsam mit dem APTL ein Spiegelfeld für einen Solarturm zu entwickeln, welches die Sonnenenergie konzentriert und in thermische Energie umwandelt.

Das APTL übernimmt die Aufgabe der Beschichtung des Absorbers mit einem Katalysator und erarbeitet ein Simulationsmodell der Absorberstruktur.

1.3 Ziel dieser Bachelorarbeit

Ziel dieser Arbeit ist der Aufbau und Betrieb eines Teststandes zur kontinuierlichen solaren Reformierung von CH_4 . Dafür wird ein bereits bestehender Reaktor wieder verwendet, welcher für die entsprechenden Anforderungen im Teststand angepasst wird. Die Hauptaufgaben bestehen in der Auswahl von Mess- und Regelungskomponenten und deren Integration in den Teststand. Dafür muss eine Schnittstelle zwischen den Mess- und Regelungskomponenten und dem Programm LabVIEW erstellt werden. Des Weiteren erfolgen Kalibrierung und Betrachtung der Messungenauigkeiten der Mess- und Regelungstechnik. Als letzten Schritt werden die Inbetriebnahme und Versuchspläne für die erste Testkampagne ausgearbeitet.

2 Stand der Technik

In diesem Abschnitt werden zunächst die Grundlagen konzentrierender Solartechnik erläutert, sowie die verwendeten Materialien für den Absorber und der Hochleistungsstrahler näher beschrieben. Abschließend wird näher auf den chemischen Prozess der Methanreformierung eingegangen.

2.1 Konzentrierende Solartechnik

Die Grundidee bei dieser Technik besteht darin, Sonnenenergie mit Hilfe von beweglichen Reflektoren (Spiegeln), die der Sonne nachgeführt werden, auf einen Fokus zu konzentrieren. Dadurch entstehen sehr hohe Wärmeströme, welche durch einen Receiver an ein Trägermedium abgegeben werden und für Kraftwerks- und Chemieprozesse genutzt werden können. Außerdem kann mit Hilfe des Trägermediums die erzeugte Hochtemperaturwärme zwischengespeichert und bei Bedarf wieder abgerufen werden [9]. Derzeit haben sich vier Grundsysteme etabliert: Parabolrinnen, Linear-Fresnel Systeme, Dish-Systeme und Solartürme. Diese Systeme sind in Abbildung 2.1 dargestellt.



A



B



C



D

Abbildung 2.1 A=Parabolrinnen, B=Linear-Fresnel System, C=Dish-System, D=Solarturm [10]

Parabolrinnen und Linear-Fresnel-System verwenden als Trägermedium Öl, Wasserdampf oder Salzschnmelzen und gehören zu den linienfokussierenden Systemen. Dies bedeutet, dass die Sonnenstrahlung über die gesamte Länge auf einen in der Fokallinie liegenden Absorber konzentriert wird, siehe Abbildung 2.2. Auf Grund der Stromgestehungskosten sind Parabolrinnen und Linear-Fresnel-System auch für die Stromerzeugung im MW Bereich interessant [11]. Durch die Linienfokussierung erreichen Parabolrinnen und das Linear-Fresnel-System maximale Temperaturen von 500 °C und sind für die Verwendung in solarthermisch betriebenen chemischen Prozessen ungeeignet.

Im Gegensatz zu den oben beschriebenen linienfokussierenden Systemen werden bei Dish-System und Solartürmen die Sonnenstrahlen auf einen Punkt konzentriert, siehe Abbildung 2.2. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von punktfokussierenden Systemen.

Mit Dish-Systemen können hohe Temperaturen erzeugt werden, nehmen jedoch aufgrund ihrer hohen Kosten insbesondere im MW Bereich im Feld der konzentrierenden Technologien derzeit nur eine Randposition ein [11].

Eine interessante Möglichkeit zur Stromerzeugung oder die Nutzung für solarthermisch betriebene chemische Prozesse bietet der Solarturm. Dieser besitzt im Vergleich zum Dish-System günstigere Stromgestehungskosten. Weiterhin können durch Konzentrierung der Sonnenstrahlen hohe Temperaturen auf der Turmspitze eines Solarturms erzeugt werden. Daher ist diese Technologie im Feld der konzentrierenden Solartechnik für solarthermisch betriebene chemische Prozesse geeignet.

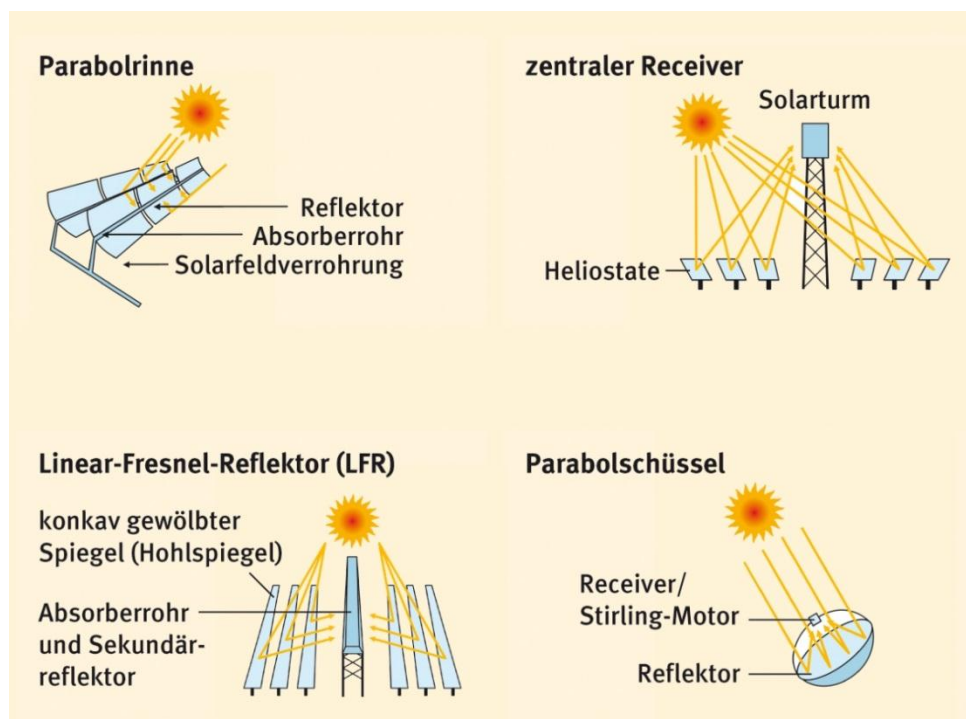


Abbildung 2.2 Vergleich von Linienfokussierung (links) und Punktfokussierung (rechts) [12]

2.1.1 Solarturmtechnologie

Bei dieser Form der konzentrierten Solarstrahlung sind hunderte bis tausende Spiegel um einen Turm angeordnet. Das Spiegelfeld, auch Heliostatfeld genannt, wird der Sonne so nachgeführt, dass die reflektierte Strahlung immer auf die Turmspitze gerichtet ist. Die Ausrichtung der Spiegel muss möglichst genau sein, um eine maximale Abweichung von deutlich weniger als einem Grad zu erhalten. Nur so ist gewährleistet, dass die reflektierte Sonnenstrahlung den Brennpunkt ideal trifft. Im Brennpunkt auf der Turmspitze befindet sich ein Receiver, welcher durch die hochkonzentrierte Sonnenstrahlung zwischen 600- 1000 °C erhitzt wird und die Wärme an ein Trägermedium abgibt. Derzeit werden zwei verschiedene Wege in der Verwendung von Solartürmen beschritten. Ein Weg ist es, die konzentrierte Strahlung für die Erzeugung von Elektrizität zu nutzen. Bei der Produktion von Elektrizität kommen Wasserdampf, Flüssigsalze, Flüssigmetalle oder Gase als Wärmeträgermedium zum Einsatz. In Abbildung 2.3 ist exemplarisch eine Möglichkeit zu Erzeugung von Elektrizität mit dem Wärmeträgermedium Luft dargestellt. Dabei wird Luft durch einen volumetrischen Receiver gesaugt. Durch die konzentrierte Strahlung erhitzt sich der Receiver und gibt die Wärme an die angesaugte Luft weiter. Dabei erreicht die Luft Temperaturen von bis zu 850 °C und kann genutzt werden, um Wasserdampf zu erzeugen. Der Wasserdampf kann wiederum dazu verwendet werden, um eine Dampfturbine zu betreiben und schließlich Elektrizität zu erzeugen. Dieses Verfahren wird beispielsweise am Solarturm Jülich zur Stromerzeugung genutzt [13].

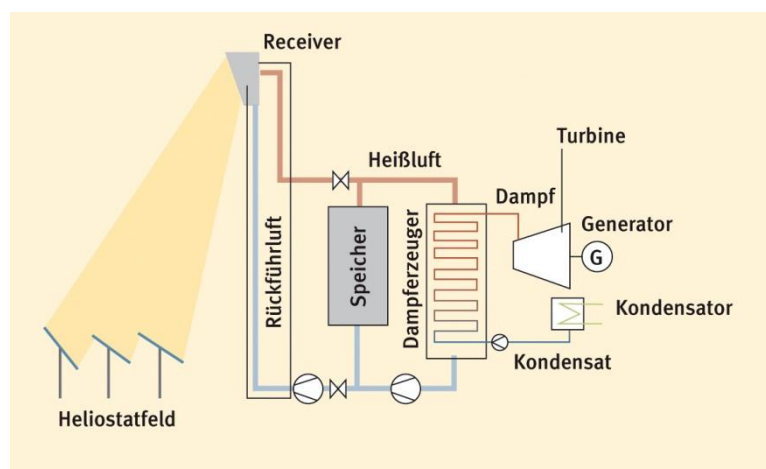


Abbildung 2.3 Solarturm als Kraftwerk [14]

Ein anderer Weg in der Nutzung von Solartürmen ist es, durch thermochemische Prozesse Brennstoffe zu erzeugen. Bei dieser Form der Nutzung von Solartürmen können die erhitzten Trägermedien genutzt werden, um einen Reaktor mit der nötigen Reaktionswärme für thermochemische Prozesse zu versorgen. Alternativ können die Trägermedien auch entfallen und die Edukte für den thermochemischen Prozess werden direkt in den Receiver geleitet, wobei die hohen Temperaturen im Receiver zu einer thermochemischen Reaktion führen. Je nach Nutzung von Solartürmen (entweder Produktion von Elektrizität oder für thermochemische Prozesse) kommen unterschiedliche Receivertypen zum Einsatz. Diese werden im nächsten Abschnitt näher beschrieben.

2.1.2 Receiver

Der Receiver eines Solarturms kann direkt oder indirekt der konzentrierten Strahlung ausgesetzt sein. Bei indirekt bestrahlten Receivern findet der Wärmeaustausch mit dem Wärmeträgermedium nicht auf der Oberfläche, welche der konzentrierten Strahlung ausgesetzt ist, statt. Es wird stattdessen eine lichtundurchlässige Zwischenwand verwendet, welche von der Solarstrahlung aufgeheizt wird und ihre Wärme beispielsweise an einen Rohrabsorber abgibt.

Eine weitere Methode besteht in der direkten Bestrahlung des Receivers. Durch diese Variante entfällt die Zwischenwand und das Fluid oder die Luft wird direkt von der Solarstrahlung erhitzt. Zentrales Bauelement ist dabei der sogenannte Absorber. Dieser absorbiert die konzentrierte Strahlung und gibt sie direkt wieder an das Fluid bzw. die Luft ab, welche über den Absorber strömt. Direkt bestrahlte Receiver sind häufig in volumetrischer Form aufgebaut. Der Absorber besteht dabei häufig aus einer feststehenden Matrix, angeordnet in Schaum- oder Wabenstrukturen, bestehend aus Keramiken oder Metallen. Durch diese Strukturen ist es dem Absorber möglich, die konzentrierte Strahlung zu absorbieren und gleichzeitig genügend Wärme an das Wärmeträgermedium abzugeben. Durch eine Waben- oder Schaumstruktur ist die Wärmeübertragungsfläche innerhalb der Absorber deutlich größer als die Fläche, welcher der Strahlung zugewandt ist. Die Absorberfront wird durch die heranströmende Luft oder durch Gase gekühlt, wodurch die hohen Temperaturen erst im Inneren des Absorbers entstehen. Die Temperaturen im Inneren des Absorbers liegen dabei deutlich über den Temperaturen des austretenden Mediums. Aufgrund der Kühlung der Absorberfront durch Luft oder Gas, bleibt die Absorberfront kühler als der innere Teil des Absorbers und auch kühler als das austretende Medium. Daher weisen volumetrische Receiver geringere thermische Rückstrahlverluste als andere Receiverarten auf.

Ein Receiver kann auch als Reaktor für chemische Prozesse verwendet werden, die dann als Receiver-Reaktoren bezeichnet werden. Dass solche Receiver-Reaktoren für die solare Methanreformierung geeignet sind, wurde bereits in verschiedenen wissenschaftlichen Arbeiten aufgeführt [15] [16] [17] [18]. Die Möglichkeit, einen Receiver als Reaktor zu verwenden, bietet sich vor allem für volumetrische direkt bestrahlte Receiver an. Die Reaktion des Mediums findet dabei direkt auf der Absorberoberfläche, welche mit einem Katalysator beschichtet ist, statt. Durch die Verwendung entsprechender Katalysatoren lässt sich beispielsweise Wasserstoff oder Synthesegas herstellen. Um die Umwelt von den chemischen Prozessen zu isolieren, wird der Receiver in geschlossener Form hergestellt. An der Strahlungsseite befindet sich ein Quarzglasfenster, wodurch die Strahlung mit geringen Verlusten zum dahinter liegenden Absorber gelangt. Aufgrund der hohen Receivertemperaturen von bis zu 1000 °C ist eine externe Kühlung des Fensters notwendig. Durch Einlässe strömen die Edukte in den Receiver und in den Absorber. Aufgrund der großen Wärme im Absorber kommt es dort zu thermochemischen Reaktionen. Das erzeugte Produkt strömt anschließend aus dem Receiver-Reaktor heraus und kann über Rohrleitungen zu weiteren Prozesskomponenten, wie Kondensatoren oder Abscheidern, transportiert werden.

2.2 Siliziumcarbid (SiC)

Siliziumcarbid ist eine chemische Verbindung zwischen Kohlenstoff und Silizium und findet bei Diesel-Partikelfiltern, Dichtungen, Lagern, Rohren und im Brandschutz seine Anwendung. Seit 1995 wird SiC als Material für Absorber und Receiver in der konzentrierten Solartechnik genutzt [19] und auch die Trägerstruktur des verwendeten Absorbers im Teststand wird aus SiC hergestellt. Der Aufbau und die Eigenschaften von SiC ähneln denen von Diamanten und es ist im Gegensatz zu vielen anderen Stoffen auch bei Temperaturen über 800 °C gegen Sauerstoff oxidationsbeständig. Diese Eigenschaft macht es besonders als Substrat für thermochemische Prozesse interessant und somit auch für die Anwendung im Feld der konzentrierten Solartechnik. Darüber hinaus besitzt SiC mit 9,6 Mohs eine hohe Härte und mit 100-140 W/mK eine gute Wärmeleitfähigkeit. Die Farbe von technischen SiC ist schwarz bis grün. Je reiner das Siliziumcarbid ist, desto grünlicher wird der Farbton.

Technisches SiC wird sehr häufig in keramischen Werkstoffen genutzt. Dabei erhält das SiC durch die Mischung mit anderen Stoffen und durch verschiedene Herstellungsprozesse unterschiedliche Eigenschaften. Grundlegend unterschieden wird zwischen offenporigen Siliziumcarbidkeramiken und dichten Siliziumcarbidkeramiken. Zu den offenporigen zählen rekristallisiertes Siliziumcarbid (RSiC) und nitrid-bzw. oxynitrid gebundenes Siliziumcarbid (NSiC). Zu den dichten Siliziumcarbidkeramiken gehören gesintertes Siliziumcarbid (SiSiC) oder auch flüssigphasengesintertes Siliziumcarbid (LPSSiC).

Die Trägerstruktur des verwendeten Absorbers im Teststand wird aus RSiC hergestellt, welches aus reinem SiC ohne Zugabe von weiteren Stoffen besteht. Es besitzt eine Porosität von 11-15% und wird bei hohen Temperaturen von 2300-2500 °C gebrannt. Im Vergleich zu dichten SiC-Keramiken besitzt RSiC eine geringere Festigkeit. Jedoch weist RSiC gute Temperaturwechseleigenschaften auf und kann aufgrund seiner Formstabilität beim Brennen auch für die Herstellung großer Bauformen verwendet werden. Die maximale Anwendungstemperatur beträgt 1600 °C, somit ist RSiC für die Verwendung in solarthermochemischen Prozessen geeignet. Damit die Kanäle des Absorbers die nötige Gasdichtigkeit erhalten werden diese mit flüssigem Silizium infiltriert. Durch diesen Prozessschritt wandelt sich das RSiC zu SiSiC.

2.3 Xenon-Hochleistungsstrahler

Im Hochleistungsstrahler (HLS) des DLR am Standort Köln können unter kontrollierten Strahlungsbedingungen wissenschaftliche Experimente und Versuche im Bereich der Solartechnik durchgeführt werden. Der Strahler bietet den Vorteil, dass Experimente und Versuche unabhängig von der Jahreszeit bzw. der Wetterlage, auch über mehrere Tage hinweg, unter konstanten Bedingungen erfolgen können.

Im Wesentlichen besteht der Strahler aus zehn Xenon Kurzbogenlampen mit elliptischen Reflektoren, die eine elektrische Leistungsaufnahme von 6000 W besitzen (siehe Abbildung 2.4). Das gesamte Strahlersystem kann maximal eine Lichtleistung von 20 kW abgeben. Durch die konzentrierte Strahlung der Xenonlampen können Temperaturen bis zu 1500 °C erzeugt werden, wobei das erzeugte Lichtspektrum der Xenonlampen dem der Sonnenstrahlung ähnelt [20].

Die Lampen können individuell eingeschaltet und ausgerichtet werden, wodurch unterschiedliche Strahlungsflussdichten erreicht werden können. Die erzeugte Strahlung der Lampen trifft auf den drei Meter entfernten Zielbereich.

Im Fall des ContiSol Teststandes befindet sich im Fokus der Receiver-Reaktor mit dem Absorber. Der Reaktor ist dabei auf einen in drei Achsen beweglichen Tisch gelagert, wodurch die Position des Reaktors zum Strahler verändert werden kann.

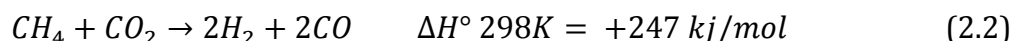
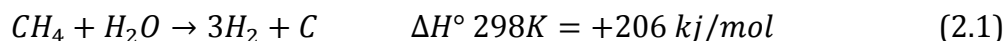
Zur Regulierung der Strahlungsintensität gibt es einen Shutter. Dieser besteht aus 13 wassergekühlten Lamellen, die mit Schrittmotoren verstellt werden. Um die genaue Flussdichte zu bestimmen, die von den Lampen erzeugt wird, kommt das optische Messsystem FATMES (Flux and Temperature Measurement System) zum Einsatz.



Abbildung 2.4 Frontansicht der zehn Xenonstrahler

2.4 Reformierung von Methan

Derzeit haben sich zwei industrielle Verfahren zur Reformierung von Methan zu Synthesegas etabliert. Man unterscheidet dabei zwischen Dampfreformierung und Trockenreformierung, welchen die Gleichungen (2.1) und (2.2) zu Grunde liegen:



Beide Reaktionen erfolgen endotherm, deshalb ist der Energiegehalt der Produkte größer als der Energiegehalt der Edukte. Die in der Industrie genutzten Temperaturen für die Reaktion liegen im Bereich von 800-1000 °C [21]. Der Unterschied in beiden Reformierungsprozessen liegt darin, dass bei der Dampfreformierung Wasserdampf und bei der Trockenreformierung Kohlendioxid eingesetzt wird.

Durch die Trockenreformierung können Erdgasquellen verwendet werden, welche einen hohen CO₂ Anteil aufweisen. Diese Quellen werden derzeit aus wirtschaftlichen Gründen nicht genutzt, weil die Kosten für Reinigung und Transport zu hoch sind. Des Weiteren kann

Erdgas oder CH_4 mit CO_2 als Abfallprodukt aus Industrieprozessen gemischt werden, um es durch Trockenreformierung zu Synthesegas umzuwandeln. Daher gewinnt die Trockenreformierung in der Industrie zunehmend an Bedeutung. Eine günstige Zusammensetzung für die Herstellung von Synthesegas aus CO_2 -haltigem Erdgas ist in Abbildung 2.5 dargestellt. Das erzeugte Synthesegas eignet sich durch seine Zusammensetzung insbesondere zur Herstellung von Methanol.

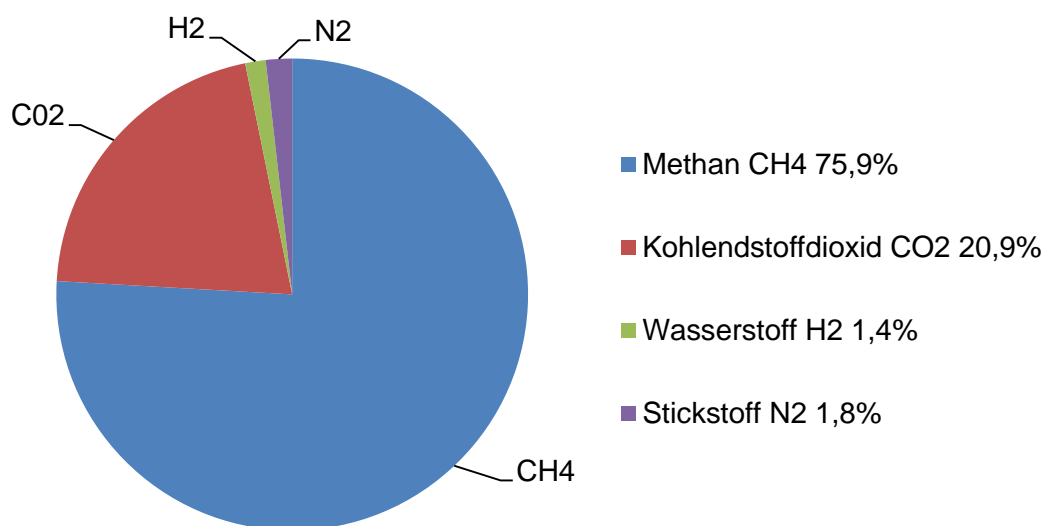


Abbildung 2.5 Zusammensetzung Erdgas mit einem hohen CO_2 Anteil

2.5 Katalysatoren für die Methanreformierung

Die Verwendung eines Katalysators kann die Geschwindigkeit der Methanreformierung beeinflussen, wobei der Katalysator seine Eigenschaften über die Reaktion hinweg nicht ändert. Durch die Verwendung eines Katalysators kann keine Reaktion ausgelöst werden, welche thermodynamisch nicht möglich ist, wobei der Katalysator nur die Reaktionsgeschwindigkeit beeinflusst und nicht das Reaktionsgleichgewicht.

Um die Reformierung von Methan zu Synthesegas zu ermöglichen, wurden verschiedene Materialien für die Verwendung als Katalysatoren genauer erforscht. Dabei zeigte sich, dass vor allem Katalysatoren aus den Edelmetallen wie Rh, Ru und Pt eine hohe Methanumsatzrate ermöglichen und hohe Selektivität aufweisen [22] [23] [24]. Des Weiteren wurden auch Katalysatoren getestet, mit denen die Reformierung von Methan bei geringeren Temperaturen ($T < 823\text{K}$) stattfinden kann [25].

Allgemein sind Edelmetallkatalysatoren aktiver und stabiler als Nichtedelmetallkatalysatoren, jedoch auch deutlich teurer. Daher sind auch Nichtedelmetalle für katalytische Prozesse interessant. Für die Methanreformierung kommt daher sehr häufig auch Ni als Material für Katalysatoren zum Einsatz [25] [6]. Ni ist im Vergleich zu Katalysatoren aus Edelmetallen deutlich günstiger und weist trotzdem hohe Umsatzraten und Selektivitäten auf.

Für den verwendeten Absorber hat das APTL einen Katalysator bestehend aus Rh und Al_2O_3

ausgewählt und ausgiebig getestet. Mit diesem Katalysator kann die Reformierung von Methan zu Synthesegas bei Temperaturen von 650 °C bis 900 °C erfolgen, wobei zu beachten ist, dass der Absorber keine Temperaturen über 950 °C erreicht, da ansonsten der Katalysator beschädigt wird.

Vor dem eigentlichen Versuchsbeginn wird der mit dem Katalysator beschichtete Absorber von H_2 durchströmt. Durch die Durchströmung wird der Katalysator aktiviert und O_2 , welches durch Oxidation am Katalysator haftet, herausgelöst. Würde sich noch O_2 auf dem Katalysator befinden, könnte die Reformierung von Methan zu Synthesegas nicht stattfinden.

3 Der ContiSol Teststand

In diesem Teil der Arbeit werden die verwendeten Komponenten im Teststand und deren Funktionen näher beschrieben und dargestellt.

3.1 Aufbau des Teststands

Das zentrale Element des Teststandes ist der Receiver-Reaktor mit einem integrierten Absorber. Zur Inbetriebnahme des Teststandes und damit zur Durchführung von Versuchen müssen noch weitere Komponenten im Teststand integriert werden. In Abbildung 3.1 ist ein vereinfachter Aufbau des Teststandes mit den wichtigsten Komponenten dargestellt.

Die für die Versuche benötigten Gasströme werden über Volumenstromregler eingestellt. Über Rohrleitungen gelangen die Gase und der Wasserdampf zu einem Gaserhitzer und werden dort auf bis zu 550 °C vorgeheizt. Der Gaserhitzer dient dazu, einen Wärmeüberträger zu simulieren, welcher die Wärme des produzierten Synthesegases zum Vorheizen der zu reformierenden Gase nutzt. Die vorgeheizten Gase und der Wasserdampf gelangen über Rohre in den Receiver bzw. in den Absorber, wo die Reformierung zu Synthesegas stattfindet. Der Großteil des nun etwa 800 °C heißen Synthesegases wird anschließend in einem Gaskühler heruntergekühlt und in die Umwelt geleitet. Ein kleiner Teil des erzeugten Synthesegases, welches nicht in die Umwelt gelangt, wird durch einen Messgaskühler heruntergekühlt. Dies ist für die anschließende Analyse des Gases durch einen Gaschromatographen notwendig, da dieser nur für Temperaturen bis 130 °C ausgelegt ist. Für die Analyse des Synthesegases wird der Gaschromatograph mit den Gasen Ar und He über Rohrleitungen versorgt.

Durch die neuartige Zweikanalstruktur des Absorbers kann nicht nur CH₄ reformiert, sondern auch Luft erhitzt werden. Der Volumenstrom der Luft wird ebenfalls mit einem Volumenstromregler eingestellt. Zur Sicherheitsvorsorge wird der Luftstrom mit N₂ gemischt, um zu verhindern, dass es zu einer Selbstentzündung zwischen den heißen Reformgasen CH₄, CO₂ und H₂O und dem in der Luft enthaltenen O₂ kommt.

Wird ein Tagbetrieb im Teststand simuliert, strömt die Luft in den Absorber und wird dort erhitzt. Anschließend strömt die erhitzte Luft aus dem Absorber bzw. Receiver-Reaktor heraus und wird in einem zweiten Gaskühler heruntergekühlt. Der Volumenstrom der gekühlten Luft wird durch einen Durchflussmesser erfasst und in die Umwelt geleitet. Durch die Messung mit einem Durchflussmesser können später Rückschlüsse auf die Dichtigkeit der Kanalstrukturen des Absorbers gezogen werden.

Wird ein Nachtbetrieb im Teststand simuliert, wird die Luft in einem weiteren Gaserhitzer erhitzt und so ein thermischer Speicher simuliert, welcher die Luft, die im Tagbetrieb erhitzt wurde, speichern könnte. Da ein solcher thermischer Speicher für eine Anwendung in diesem Teststand zu unflexibel ist, wird der thermische Speicher durch einen Gaserhitzer ersetzt. Dieser erhitzt die Luft, welche anschließend in die Kanalstrukturen des Absorbers hineingeleitet wird und stellt dort die nötige thermische Energie für den Prozess der Reformierung zur Verfügung. Der restliche Durchlauf des Luftstroms ist identisch mit dem Luftstrom im Tagbetrieb.



3.2 Gasversorgung

Die Gasversorgung des Teststandes erfolgt durch das interne Gasnetz des Sonnensimulators. Von den Wandanschlüssen im Sonnensimulator ausgehend, wird der Gaserhitzer des Methanstroms über Kunststoffschläuche und Volumenstromregler der Fa. MKS Instruments mit den Gasen CH₄, CO₂ und H₂ versorgt. Der Druck der Gasversorgung beträgt an den Volumenstromreglern 5 bar. Zusätzlich zu diesen drei Gasen erfolgt eine Versorgung des Gaserhitzers mit Wasserdampf. Der Wasserdampf wird aus destilliertem H₂O in einem Verdampfer der Fa. ADROP erzeugt. Der Verdampfer besitzt einen internen Volumenstromregler und kann max. 10 kg Dampf pro Stunde erzeugen [26]. Die Gase Ar und He (Abbildung 3.1) dienen als Trägergase für den Gaschromatographen. Sie werden über Edelstahlleitungen und einem Vordruck von 5,5 bar direkt an den Gaschromatographen angeschlossen. Für die Luft und N₂ Versorgung werden ebenfalls die internen Leitungen des Sonnensimulators genutzt. Auch hier werden Kunststoffschläuche und Volumenstromregler der Fa. MKS Instruments verwendet.

Die verwendeten Regler im Teststand dienen zur konstanten Zufuhr der Gase. Im Volumenstromregler befinden sich eine Mess- und Regelelektronik, welche das interne Ventil des Reglers ansteuert. Vor der Verwendung müssen die Volumenstromregler etwa eine Stunde vorwärmen, da nur so gewährleistet ist, dass die Regler genau messen bzw. die korrekten Volumenströme dem Teststand zuführen. Die Gase sollten dabei in einem Temperaturbereich zwischen 0-50 °C liegen. Das angegebene Volumen der Regler wird in Standardkubikzentimeter pro Minute (sccm) bzw. in Standardliter pro Minute (slm) angegeben. Für die ersten thermischen Versuche werden die in Tabelle 3.1 beschriebenen Volumenstromregler verwendet. Ebenso sind auch kleinere oder größere Regler in den Teststand einfach integrierbar.

Gas	Größe Volumenstromregler (slm)
N ₂	200
CH ₄	50
CO ₂	20
H ₂	5
Luft	100

Tabelle 3.1 Verwendete Volumenstromregler

Die verwendeten Regler sind für N₂ kalibriert bzw. genormt. Durch die Verwendung eines anderen Gases als N₂, muss ein Gaskorrekturfaktor berechnet werden. Diese Rechnung ist in Gleichung (3.1) für das Gas CO₂ beispielhaft dargestellt.

$$GKFCO_2 = \frac{p_n, N_2 \times Cp, 0, N_2}{p_n, CO_2 \times Cp, 0, CO_2 \times s} \quad (3.1)$$

$GKFCO_2$ Gaskorrekturfaktor
 p_n, N_2 Normdichte bei 0°C und 1,013 bar (1,25 kg/m³)

	von Stickstoff	
$Cp, 0, N_2$	Normwärmekapazität von Stickstoff	(1,04 J/kg × K)
p_n, CO_2	Normdichte bei 0°C und 1.013 bar von CO ₂	(1,98 kg/m ³)
$Cp, 0, CO_2$	Normwärmekapazität von CO ₂	(0,82 J/kg × K)
s	Molekülstrukturfaktor von CO ₂	(0,941)

Das verwendete Steuergerät der Fa. MKS Instruments (647C) für die Volumenstromregler führt diese Rechnung automatisch durch, indem am Steuergerät dafür das verwendete Gas in einer Auswahl eingestellt wird. Durch den Gaskorrekturfaktor verändert sich der maximale Durchfluss im Regler [24].

3.3 Abschätzung der Druckverluste und Rohrleitungsdurchmesser

Durch die Abschätzung des Druckverlustes können die Rohrdurchmesser für Zuleitungen und Ableitung des Methanstromes und des Luftstromes bestimmt werden. Der Druckverlust wird durch die Formel (3.2) [25] berechnet:

$$\Delta p = \frac{\rho \times v^2}{2} \left(\frac{\lambda \times l}{di} + \sum \xi \right) \pm \Delta h \times g \times (\rho - \rho_{Luft}) \quad (3.2)$$

ρ	Dichte des Mediums	(kg/m ³)
v	Strömungsgeschwindigkeit	(m/s)
λ	Rohrreibungszahl	(-)
l	Länge der Rohrleitung	(m)
di	Innendurchmesser	(m)
ξ	Widerstandszahl, abhängig vom Rohrleitungselement	(-)
Δh	Unterschied der geodätischen Höhe	(m)
g	Fallbeschleunigung	(m/s ²)
Δp	Druckverlust	Pa

Um die Dichte des Methanstromes zu ermitteln, wird der prozentuale Anteil jedes Gases am Methanstrom ermittelt. Die Dichte [26] des jeweiligen Gases wird mit seinem prozentualen Anteil am Methanstrom multipliziert. Die errechneten Dichten der Gase werden anschließend addiert, um die Dichte des Methanstromes zu erhalten.

Für die Berechnung des Druckverlustes wird die Rohrreibungszahl mit $\lambda=0,1$ angenommen, was eine sehr konservative Annahme ist und der sicheren Abschätzung des max. Druckverlustes dient. Zur Berechnung des Gesamtdruckverlustes wird die Verrohrung und der Receiver-Reaktor in einzelne Abschnitte unterteilt. In den einzelnen Abschnitten werden Druckverluste nach der Formel (3.2) berechnet und zu einem Gesamtdruckverlust zusammen addiert.

Für die Zusammensetzungen des Methanstroms und die Größe der Volumenströme wurden Daten aus internen Berechnungen des ContiSol Projektes genutzt.

Durch die Druckverlustrechnung und unter Berücksichtigung der verfügbaren Anschlüsse und Rohre werden für den Methanstrom die in Tabelle 3.2 aufgelisteten Rohre ausgewählt. Für den Luftstrom werden die Rohre aus Tabelle 3.3 genutzt.

Abschnitt im Teststand	Rohrinnendurchmesser (mm)
Gaserhitzer-Receiver	40
Receiverrohre (4 Stück)	10
Receiverauslass-Gaskühler	40
Gaskühler-Auslass in die Umwelt	40

Tabelle 3.2 Rohrinnendurchmesser Methanstrom

Abschnitt im Teststand	Rohrinnendurchmesser (mm)
Gaserhitzer-Receiver	40
Receiver-Absorber	16
Absorber-Receiverauslass	16
Receiverauslass-Luftkühler	40
Gaskühler-Auslass in die Umwelt	40

Tabelle 3.3 Rohrinnendurchmesser Luftstrom

3.4 Gaserhitzer für den Methanstrom

Im Teststand wird eine Wärmerückgewinnung aus dem erzeugten Synthesegas durch einen Gaserhitzer simuliert. Durch den Gaserhitzer können die Edukte des Methanstroms vor der Reformierung vorgeheizt werden. Um die Ausgaben des Projektbudgets möglichst gering zu halten, wird der Gaserhitzer aus am DLR vorhandenen Komponenten zusammengestellt. Der Gaserhitzer besteht im Wesentlichen aus zwei Hauptkomponenten. Die erste Komponente ist ein Rohrofen der Fa. Horst mit einer elektrischen Leistung von 2000 W. Dieser kann mithilfe von elektrischen Heizleitungen, welche sehr dicht um das Ofenrohr gewickelt sind, Temperaturen von 50-1000 °C erzeugen. Die Temperaturregelung erfolgt über ein Steuergerät an dem die Temperatur eingestellt werden kann. Das Steuergerät des Rohrofens besitzt ein Thermoelement mit dem die eingestellte Temperatur und die Temperatur im Ofen verglichen werden. Bei Bedarf werden die elektrischen Heizelemente entsprechend der Temperatur eingeschaltet oder ausgeschaltet. Das zweite Hauptelement des Gaserhitzers ist ein Edelstahlrohr mit einem Innendurchmesser von 25 mm und einer Länge von 700 mm. Dieses wird durch die Öffnungen des Rohrofens gesteckt. Dabei sind etwa 250 mm des Edelstahlrohres durch den Ofen beheizt.

Der Rohrofen wird auf die gewünschte Temperatur eingestellt und erhitzt das Metallrohr, wodurch der Methanstrom strömt und dieser erhitzt wird. An beiden Enden des Rohres befinden sich CF-40 Kreuzstücke, die durch Flansche verschlossen sind bzw. mit Anschlüssen für Thermoelemente, Drucksensoren und Gasanschlüssen abschließen. An einem Ende des Rohres strömt über das Kreuzstück der kalte Methanstrom in das Edelstahlrohr und am anderen Ende wird der erhitzte Methanstrom zum Receiver-Reaktor geführt.

3.5 Receiver-Reaktor

Für den Teststand kann ein bereits existierender Receiver-Reaktor, siehe Abbildung 3.2, wieder verwendet werden. Der Receiver-Reaktor wurde bereits für das Projekt Hydrosol am DLR genutzt [27], indem mithilfe konzentrierter Solarstrahlung Wasserstoff produziert wurde.



Abbildung 3.2 Hydrosol 1 Receiver-Reaktor [14]

Der Receiver-Reaktor ist für einen kontinuierlichen Betrieb im Teststand ausgelegt, sodass ein konstanter Reaktandenstrom in den Reaktor eingespeist und ein gleichgroßer Produktstrom abgeführt wird. Im ContiSol Teststand besteht der Reaktandenstrom aus dem Methanstrom und dem Luftstrom, als Produktstrom wird Synthesegas bzw. je nach Betrieb ein heißer oder kalter Luftstrom abgeführt.

Um den Receiver-Reaktor für den Teststand zu nutzen, werden die Leitungen von $\varnothing 6 \times 1$ mm auf $\varnothing 12 \times 1$ mm erweitert und auf der gesamten Rohrlänge Edelstahl (1.4301) verwendet. Durch die Vergrößerung der Rohre können größere Volumenströme bei verringertem Druckverlust dem Receiver-Reaktor zugeführt werden. Um die größeren Rohre in den Receiver-Reaktor zuführen, werden neue Swagelokverbindungen an den Receiver-Reaktor angeschweißt. Damit der Auslass des Receiver-Reaktors mit der nachfolgenden Verrohrung verbunden werden kann, wird ein CF-40 Flansch an den Auslass geschweißt. In Abbildung 3.3 sind die Veränderungen dargestellt.

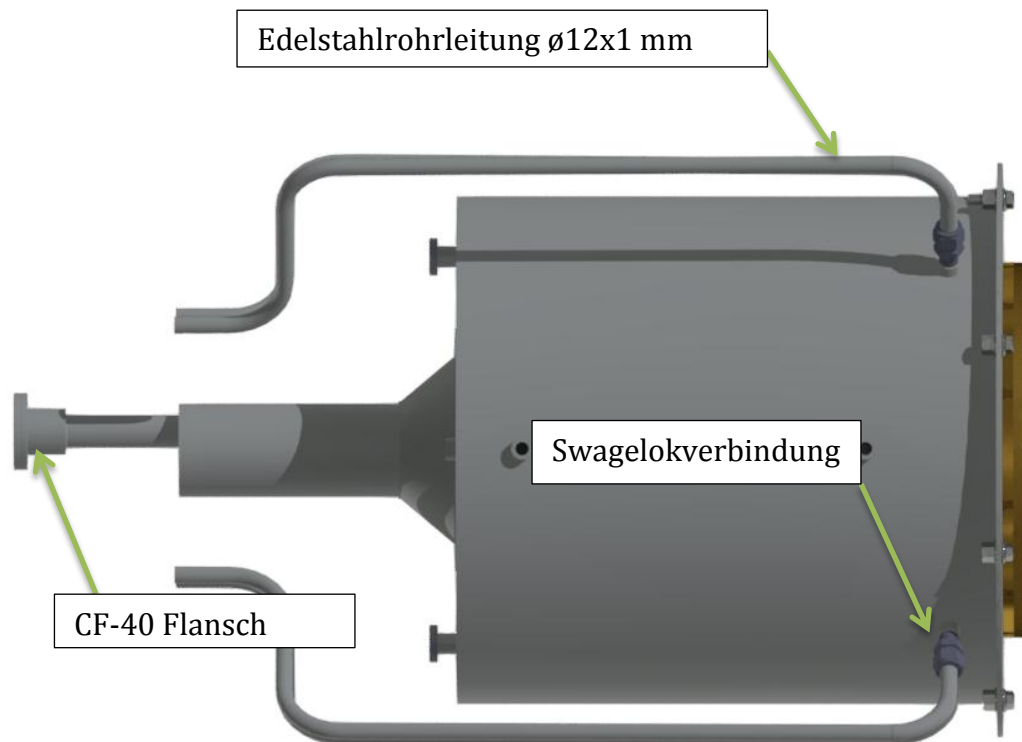


Abbildung 3.3 Äußere Änderungen des Receiver-Reaktors (Ansicht von oben)

An der Front des Receiver-Reaktors befindet sich ein Quarzglasfenster, das an den Seiten durch einen Wasserstrom gekühlt wird. Hinter dem Fenster befindet sich ein Metalltrichter in den vier Edelstahlleitungen hinein ragen. Weil der Methanstrom vor dem Receiver-Reaktor erhitzt wird, werden um die Rohrleitungen Heizbänder der Fa. Horst gewickelt und mit Glasfaserbändern isoliert, wodurch eine Abkühlung des Methanstromes verhindert wird. Über die vier Edelstahlrohrleitungen wird der Methanstrom dem Absorber zugeführt, siehe Abbildung 3.4. Der Absorber befindet sich in der Mitte des Receivers. Die Front des Absorbers ist der konzentrierten Strahlung der Sonne bzw. der im Teststand verwendeten Xenonstrahler ausgesetzt und die Rückseite des Absorbers endet in einem Keramiktrichter der mit dem Ausgang des Receiver-Reaktors verbunden ist, siehe Abbildung 3.5. Durch den Ausgang wird das produzierte Synthesegas abgeführt. Um die neuartige Struktur des Absorbers zu nutzen und Luft im Absorber zu erhitzen oder durch die erhitzte Luft, CH_4 zu reformieren, wurden spezielle Absorberanschlüsse aus Edelstahl am DLR konstruiert, die den Absorber mit dem Luftstrom (siehe Abbildung 3.5) verbinden. Für die Versorgung des Absorbers mit der Luftzufuhr bzw. der Luftabfuhr werden CF-16 Wellenschläuche verwendet die in CF-16 Rohranschlüsse an der Receiverrückwand enden, siehe Abbildung 3.6. Die Anschlüsse an der Rückwand des Receiver-Reaktors werden ebenfalls neu hinzugefügt. Der gesamte Innenraum des Receivers wird mit einer Isolierung ausgefüllt, wodurch Wärmeverluste minimiert werden. Als Isolierung wird Insulfrax der Fa. Unifrax verwendet. Es ist für sehr große Temperaturen von bis zu 1200°C geeignet und besitzt bei der erwarteten Temperatur von 800°C eine Wärmeleitfähigkeit von $0,27 \text{ W/mK}$ [28]. Ein weiterer Vorteil

ist, dass dieses Material, im Vergleich zu Isolierungen aus Keramikfasern, nicht lungengängig ist, wodurch Gesundheitsrisiken reduziert werden.

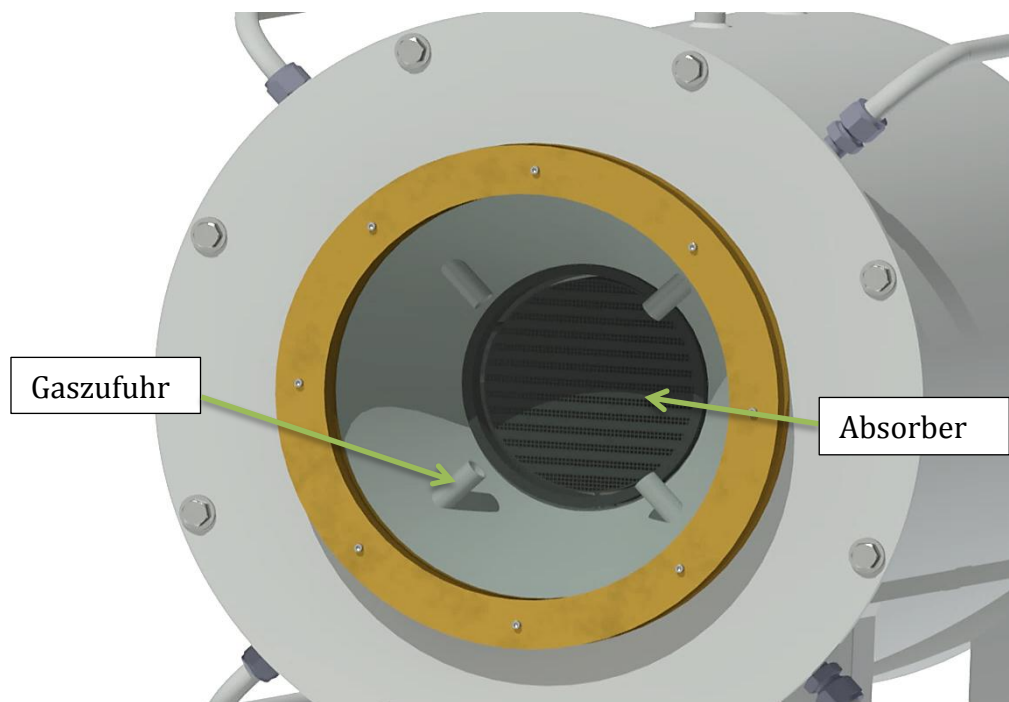


Abbildung 3.4 Frontansicht Receiver-Reaktor

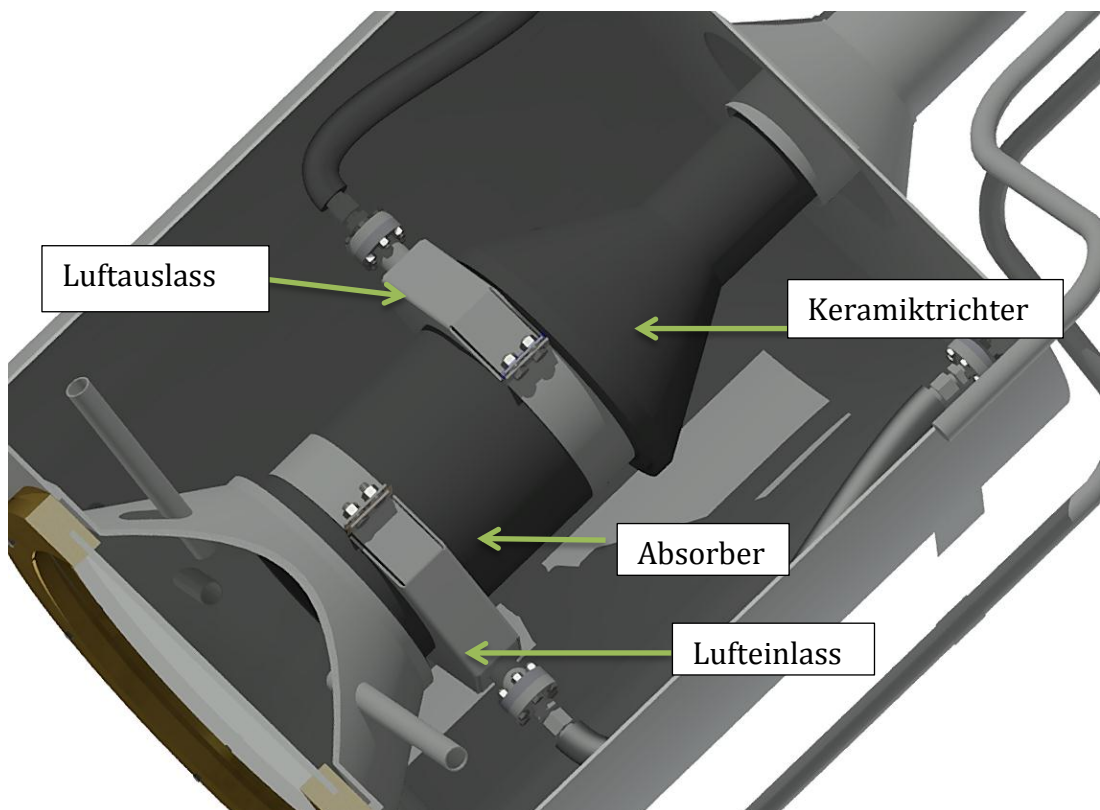


Abbildung 3.5 Innenansicht Receiver Reaktor

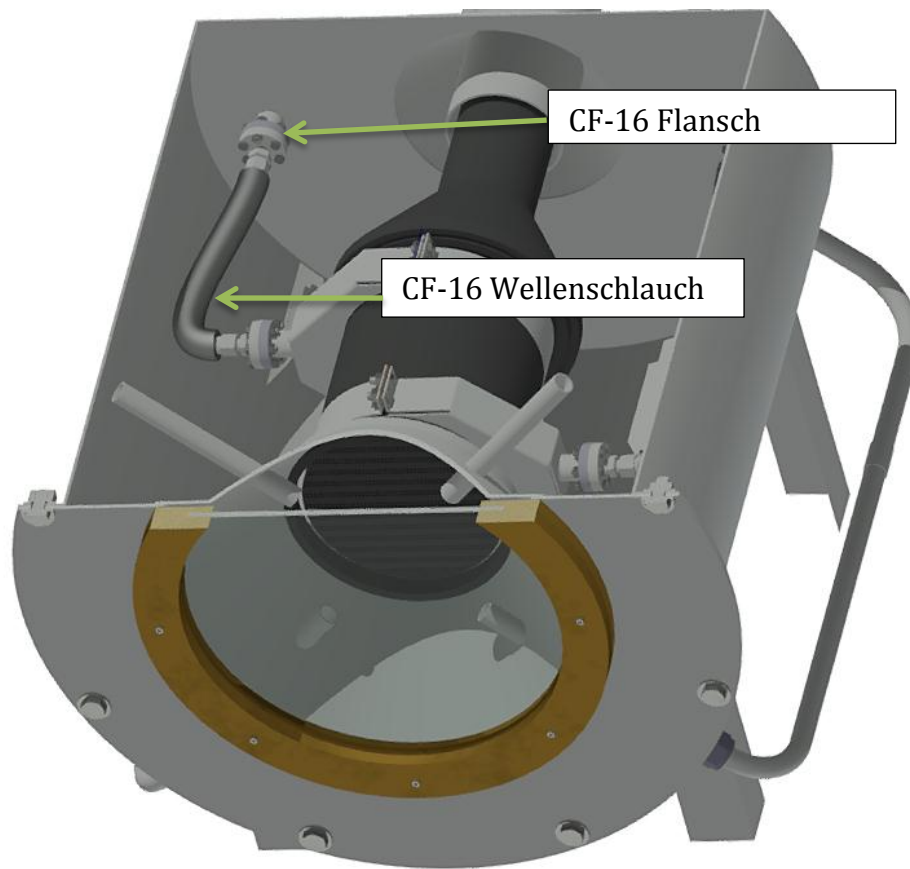


Abbildung 3.6 CF-16 Wellenschlauch und Flansch

3.6 Absorber

Der Absorber beinhaltet eine Zweikanalstruktur mit der zeitgleich Luft erhitzt und CH_4 zu Synthesegas reformiert werden kann. Die Grundstruktur des Absorbers besteht aus rekristallisiertem Siliziumcarbid (RSiC) und wird von der Fa. Liqtech hergestellt. Beim Herstellungsprozess wird die weiche Siliziumkeramikmasse durch einen Extruder in eine 3-D Kanalstruktur geformt und anschließend in einem Ofen gebrannt. Der produzierte Absorber besitzt eine Länge von 200 mm und einen Durchmesser von 144 mm. Insgesamt besitzt der Absorber 1800 Kanäle wovon 900 Kanäle für die Reformierung von CH_4 und 900 für den Luftstrom genutzt werden. Er besitzt eine effektive Oberfläche zur Reformierung von CH_4 von $1,44 \text{ m}^2$ und eine Oberfläche zur Erhitzung der Luft von $1,00 \text{ m}^2$. Die konzentrierte Strahlung trifft auf eine Frontoberfläche von $0,016 \text{ m}^2$ und erhitzt ein Materialvolumen von $0,0018 \text{ m}^3$.

Um die Zweikanalstruktur zu ermöglichen und die Luft seitlich in den Absorber zu leiten, werden Schlitzte mit 30 mm Tiefe in einem Abstand von 6 mm in den Absorber gesägt. In der Abbildung 3.7 ist der Absorber mit den Schlitzungen zu sehen.

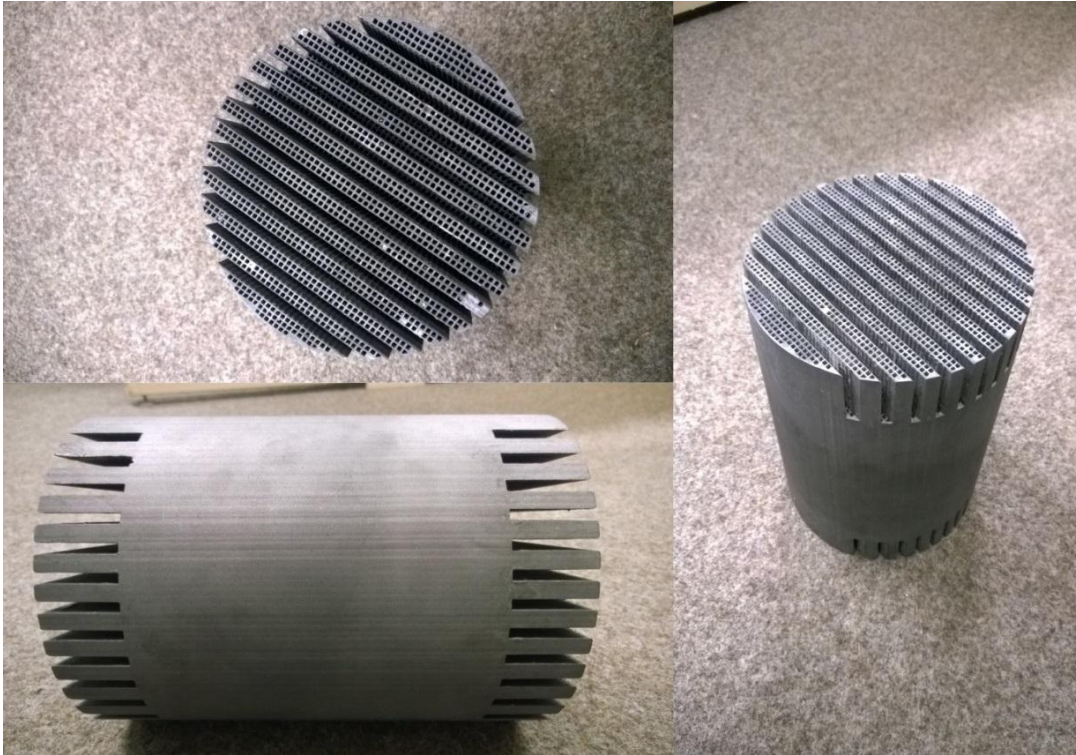


Abbildung 3.7 Absorberstruktur mit Schlitzen

Nach der Schlitzung des Absorbers wird dieser durch die Fa. Schunk mit flüssigem Silizium infiltriert, was notwendig ist, da das verwendete RSiC porös ist und somit die Möglichkeit besteht, dass es zu einem Austausch des Methanstroms und des Luftstroms innerhalb des Absorbers kommt. Das Absorbermaterial wird durch diesen Arbeitsschritt zu SiSiC und das flüssige Silizium setzt sich in die poröse Struktur des Absorbers ab, was zu einer Abdichtung der Kanalstruktur führt. Nach der Infiltrierung wird der Katalysator durch das APTL in Griechenland aufgetragen. Anschließend werden die Schlitze in den ersten 10 mm an der Absorberfront und am Ende durch Silizium infiltrierte Stäbchen verschlossen.

Damit die Stäbchen in den Schlitzen halten, werden diese mit Fiberfrax Fraxfil, unter der zur Hilfenahme einer Trägerstruktur, in den Schlitzen befestigt. Weil das verwendete Fiberfrax Fraxfil nicht gasdicht ist, wird ein Keramik Coattting (WG 180W) über die Schlitze gestrichen. Nach dem Aushärten des Klebers und des Coattings an der Luft, kann die Trägerstruktur entfernt werden und der Absorber wird nochmals bei 1000 °C gebrannt. Die einzelnen Herstellungsschritte werden noch mal in Abbildung 3.8 genauer dargestellt.

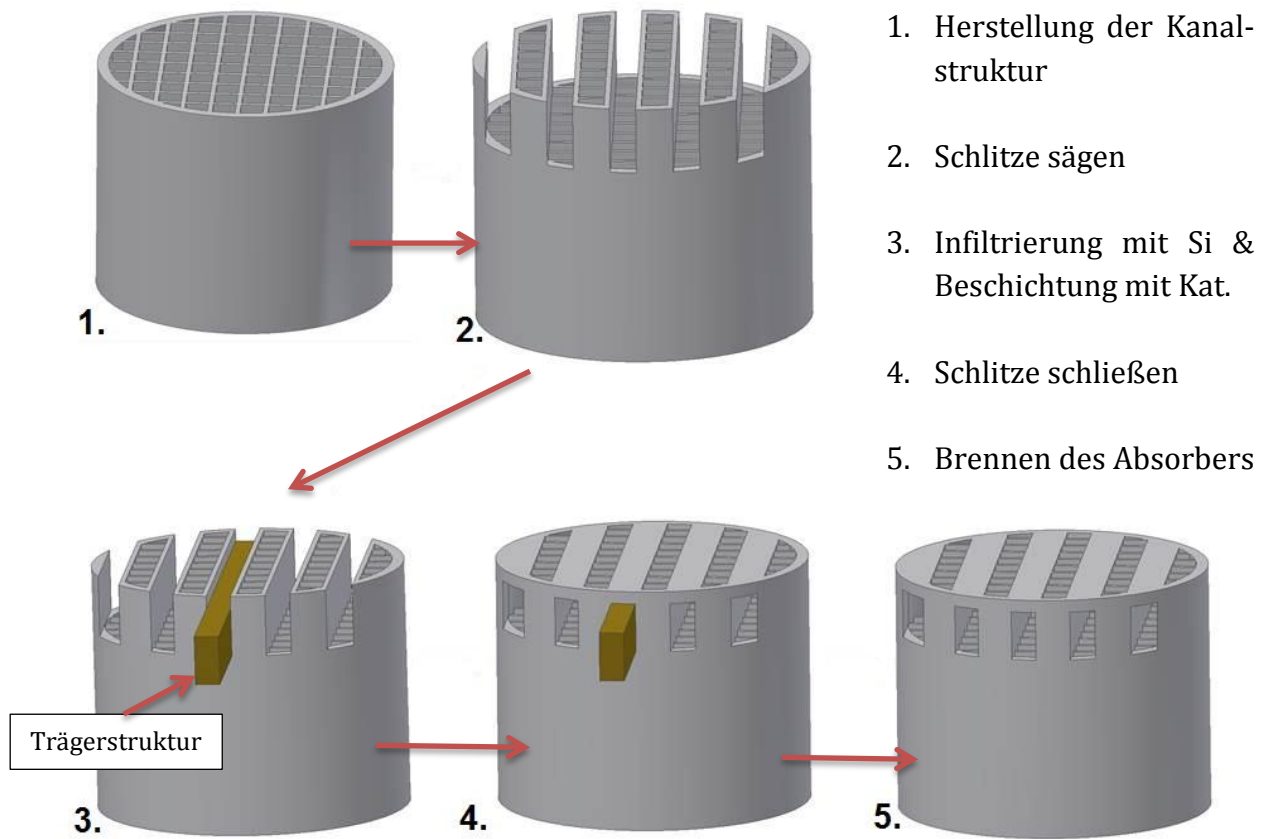


Abbildung 3.8 Produktionsschritte für die Herstellung der Lufteinlässe des Absorbers

3.7 Thermoelemente zur Temperaturerfassung

Im Teststand werden zur Überwachung und Auswertung von Versuchen, an verschiedenen Stellen die Temperaturen durch 42 Thermoelemente erfasst und gespeichert. Die Thermoelemente erfassen die Temperatur der verschiedenen Ströme am Receiver-Reaktor Ein- und Ausgang sowie an der Receiver-Reaktor Innen- und Außenwand.

Der Großteil der Thermoelemente, 27 Stück, wird in der Hauptkomponente des Teststandes, dem Absorber platziert. Dazu wird der Absorber in drei Bereiche unterteilt, indem jeweils 9 Thermoelemente platziert werden. Der erste Abschnitt, welcher der konzentrierten Strahlung ausgesetzt ist befindet sich 5 mm von der Absorberfront entfernt, der zweite Abschnitt befindet sich 100 mm und der dritte 190 mm von der Absorberfront entfernt. Durch eine detaillierte Erfassung der Temperaturen an diesen Positionen können thermische Simulationen über den Absorber validiert werden. Die genaue Platzierung der Thermoelemente sowie die Angabe zur Platzierung der Thermoelemente innerhalb eines Abschnittes, ist in Abbildung 3.9 dargestellt.

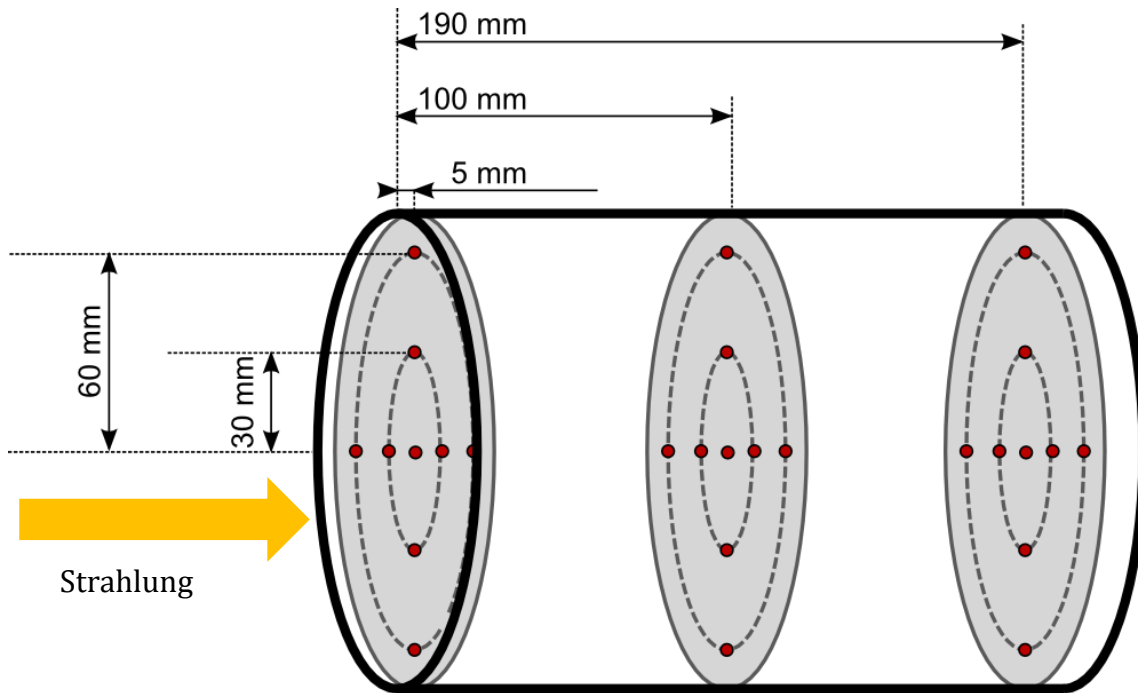


Abbildung 3.9 Platzierung der Thermoelemente im Absorber

Da die erwarteten Temperaturen im Teststand im Bereich von 20-900 °C liegen, werden die Thermoelemente vom Typ K der Fa. TC-Direct verwendet, bei denen die messbare Spannung in einem Bereich von -6,67/+54,88 mV liegen. Die verwendeten Thermoelemente bestehen aus einer NiCr-NiAl Legierung und besitzen einen Dauermessbereich zwischen 0-1100 °C [29].

Thermoelemente nutzen für die Temperaturerfassung den Seebeck-Effekt, der darauf beruht, dass es bei zwei verschiedenen Metalle zu einer Potentialdifferenz kommt, wenn diese verbunden werden. Die erzeugte Spannung ist eine Funktion der Temperatur. Um das Spannungssignal vom Thermoelement bis zur Auswertelektronik zu übermitteln, werden Kabelverlängerungen verwendet. Bei der Verwendung der Verlängerungen ist darauf zu achten, dass die Metalle der Verlängerungen mit denen der Thermoelemente gleich bzw. kompatibel sind, da es sonst zu Messfehlern kommt. Aus diesem Grund werden Ausgleichsleitungen vom Typ KX verwendet, welche mit den Thermoelementen vom Typ K kompatibel sind.

3.8 Gaskühler

Um den erhitzten Methanstrom und den Luftstrom von 800 °C auf weniger als 100 °C herunterzukühlen, wird für den Gasstrom und den Luftstrom jeweils ein Dampfkondensator der Fa. AWS-Technik verwendet. Die Verwendung der Dampfkondensatoren dient der Sicherheit und schützt vor Verbrennungen durch das heiße Synthesegas und der heißen Luft. Auch können bei einer Temperatur unter 100 °C für die Herausleitung des produzierten Synthesegases und der Luft nach draußen, kostengünstigere und flexiblere Kunststoffleitungen anstelle von Edelstahlleitungen verwendet werden.

Der Dampfkondensator enthält in seinem Inneren einen Rohrbündelwärmetauscher, der von Wasser in Raumtemperatur durchströmt wird. Die erhitzten Gase geben ihre Wärme an

die Rohrbündel und damit an das Wasser ab, wodurch sich die Gase herunterkühlen. Der Wasserdurchfluss im Rohrbündelwärmetauscher beträgt max. 8,4 l/min. Die Dampfkondensatoren sind für einen max. Volumenstrom von 37 Nm³/h [30] für Wasserdampf ausgelegt und sind damit ausreichend für die im Versuch verwendeten Gasvolumenströme dimensioniert. Der Druckverlust kann bei den verwendeten Dampfkondensatoren vernachlässigt werden, da durch das Herunterkühlen der Methan- und Luftstroms fortlaufend in den Kondensator gesaugt wird [30].

3.9 Gaschromatograph (GC)

Damit eine qualifizierte Aussage über den Wirkungsgrad und die Dichtigkeit des Absorbers getroffen werden kann, wird das produzierte Synthesegas durch einen Gaschromatographen analysiert. Bei der Gaschromatographie handelt es sich um eine analytische Methode zur Untersuchung von Gasgemischen und der Bestimmung der jeweiligen Konzentrationen der unterschiedlichen Komponenten eines Gasgemisches. Für den Teststand wird der Gaschromatograph Micro GC-490 der Fa. Varian verwendet. Der GC besteht im Wesentlichen aus den Komponenten Injektor, Säule und Detektor. Der Aufbau eines GC wird in Abbildung 3.10 veranschaulicht.

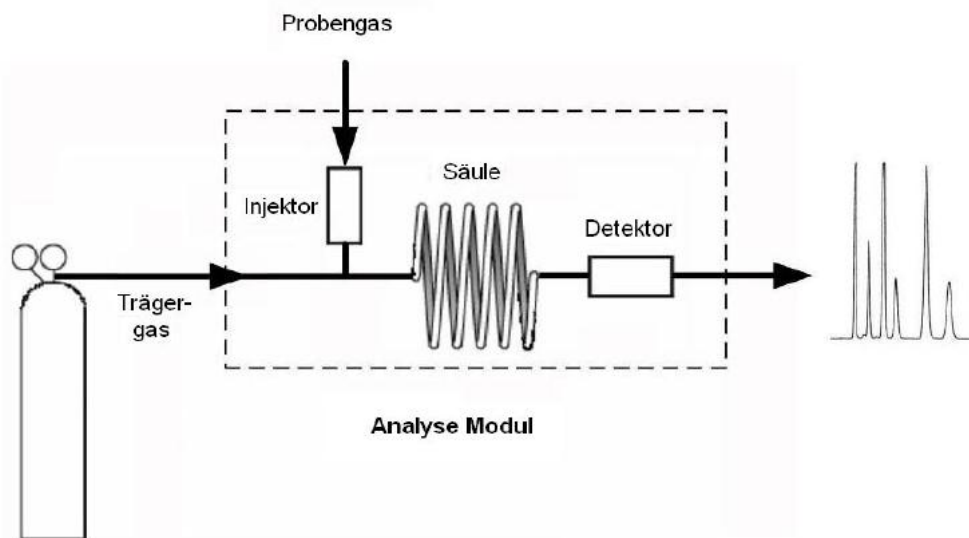


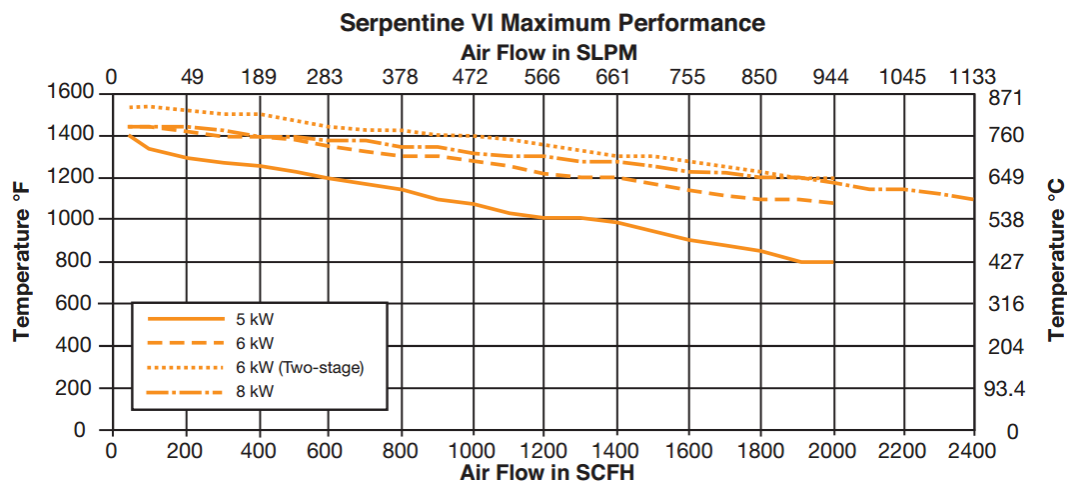
Abbildung 3.10 Prinzipieller Aufbau eines GC [31]

Eine kleine Menge des Probengases, welches aus dem Gemisch verschiedener Komponenten besteht, wird mit dem Trägergas in die Säule transportiert. In der Säule erfolgt eine Trennung des Gemisches in die einzelnen Komponenten. Aufgrund der Beschaffenheit der Säule und je nach Wechselwirkung, benötigen die verschiedenen Komponenten unterschiedlich lange für den Weg durch die Säule. Die Konzentration der einzelnen Komponenten wird am Ende der Säule durch einen Detektor gemessen. Auf Grundlage des molprozentigen Anteils jeder Komponente kann die Gaszusammensetzung berechnet werden. Im Teststand wird als Probengas das erzeugte Synthesegas verwendet, was aus den Komponenten H₂, CO, CO₂ und CH₄ besteht. Der verwendete GC setzt sich aus zwei Kanälen mit zwei unterschiedlichen Säulen zusammen. Im ersten Kanal wird eine Säule mit einem Molsieb 5A und einer Länge

von 10 m verwendet. Für diese Säule kommt als Trägergas Ar zum Einsatz. Durch die Verwendung einer Molsieb 5A Säule können die Gase H_2 , CO und CH_4 aus dem Gemisch getrennt und analysiert werden. Dabei benötigt H_2 immer die geringste Zeit (Retentionszeit), um durch die Säule zu gelangen und CH_4 die längste Retentionszeit, um durch die Säule zu strömen. Im zweiten Kanal kommt eine PPU Säule mit einer Länge von 10 m zum Einsatz bei der als Trägergas He genutzt wird. Im Inneren der PPU Säule befindet sich eine poröse Schicht, durch welche das Gasgemisch aufgetrennt wird. Durch die Verwendung der PPU Säule kann die Komponente CO_2 getrennt und analysiert werden. Der GC verwendet einen Wärmeleitdetektor um die unterschiedlichen Komponenten zu erkennen. Das elektronische Signal des Detektors wird in Abhängigkeit über die Retentionszeit in einem Graphen (Chromatogramm) dargestellt. Zur Analyse und weiteren Verarbeitung der Daten wird die Software Galaxie der Fa. Varian verwendet.

3.10 Gaserhitzer für den Luftstrom

Für den Teststand wird der Luftstrom durch den Gaserhitzer Serpentine VI der Fa. Osram Sylvania erhitzt, welcher eine Leistung von 6000 W in zwei Stufen bei einem maximalen Strom von 32 A und einer Spannung von 240 V besitzt. Über einen PID-Regler erfolgt die Regelung des Gaserhitzers im Teststand. Der Gaserhitzer kann die Luft auf max. 815 °C bei einem Volumenstrom von 49 l/min erhitzen. In Abbildung 3.11 ist eine Übersicht des Verhältnisses von Temperatur der erhitzten Luft zum Volumenstrom der Luft dargestellt.



3.11 Temperaturen Gaserhitzer bei unterschiedlichen Volumenströmen [32]

Mit der maximalen Ausgangstemperatur von 815 °C erfüllt der Gaserhitzer die projektinternen Anforderungen eine Lufttemperatur von 900 °C bei Volumenströmen von 50-500 l/min zu erreichen nicht. Diese angestrebten 900 °C bei Volumenströmen von 50-500 l/min sind jedoch mit denen auf dem Markt angebotenen Gaserhitzern nicht zu erreichen, da bei den meisten Gaserhitzern die Luft nur auf Temperaturen von 700 °C bei Volumenströmen von max. 100 l/min erhitzt werden kann. Zwar gibt es auch Gaserhitzer die in der Lage sind Luft auf 900 °C zu erhitzen, jedoch benötigen solche Gaserhitzer hohe Volu-

menströme von min. 500 l/min, da ansonsten die Heizelemente aufgrund der zu hohen Hitzeentwicklung beschädigt werden.

Aus diesen Gründen stellt der verwendete Gaserhitzer Serpentine VI eine gute Zwischenlösung dar. Der Gaserhitzer liefert sowohl bei kleinen, als auch bei höheren Volumenströmen hohe Temperaturen. Diese Eigenschaft ist besonders für die ersten Tests, bei denen Volumenströme von 10-300 l/min verwendet werden, von Vorteil. Damit der Gaserhitzer in den Teststand integriert werden kann, wird an der Luftaustrittseite ein CF-40 Flansch angeschweißt. Durch diese Anschlüsse kann der Gaserhitzer mit dem Luftstrom und dem Receiver-Reaktor verbunden werden.

3.11 Durchflussmesser

Um eine Aussage über die Dichtigkeit der Kanalstruktur im Absorber zu treffen, wird der Volumenstrom des heruntergekühlten Luftstroms nach dem Luftkühler gemessen und mit dem Wert des Volumenstroms der Luft vor dem Absorber verglichen. Zur Ermittlung des Volumenstroms vor dem Absorber, werden die eingestellten Volumenströme der Luft und des Stickstoffes addiert. Sollte der gemessene Volumenstrom nach dem Absorber eine Differenz zum Volumenstrom vor dem Absorber aufweisen, ist davon auszugehen, dass die Kanalstruktur des Absorbers undicht ist und es zu einem Austausch zwischen dem Methanstrom und dem Luftstrom kommt.

Zur Ermittlung der Dichtigkeit des Absorbers könnte auch der Volumenstrom des Methanstroms ermittelt werden. Dies stellt jedoch eine technische Hürde dar, weil im Versuch durch die Variierung der Anteile der Edukte unterschiedliche Synthesegaszusammensetzungen produziert werden. Dies hat wiederum zur Folge, dass die Dichten und die Viskosität der produzierten Synthesegase ebenfalls variieren. Durch die großen Variierungen ist es schwierig einen Durchflussmesser zu verwenden bzw. zu konstruieren der alle möglichen Variationen abdeckt. Daher wird der Durchfluss nur im Luftstrom gemessen, im welchen keine Variationen der Zusammensetzungen auftreten.

Zur Ermittlung des Durchflusses im Teststand wird der RAMCO Schwebekörper Durchflussmesser der Fa. Yokogawa verwendet. Der verwendete Durchflussmesser eignet sich auf Grund seines Messprinzips für die Bestimmung der Volumenströme von Gasen und Flüssigkeiten und ist somit zur Ermittlung des Luftstroms im Teststand geeignet. Das Messprinzip eines Schwebekörperdurchflussmessers ist rein mechanisch. Ein metallischer Schwebekörper befindet sich in einem konisch geformten Rohr. Durch eine Erhöhung des Volumenstroms steigt der Schwebekörper im Rohr hinauf. Fällt der Volumenstrom, sinkt der Schwebekörper im Rohr herunter. Die genaue Position des Schwebekörpers im Rohr wird mit einem Magneten ermittelt, welcher sich an der Außenwand des Rohres befindet. Durch einen Messumformer wird die Position in ein elektrisches Signal umgewandelt.

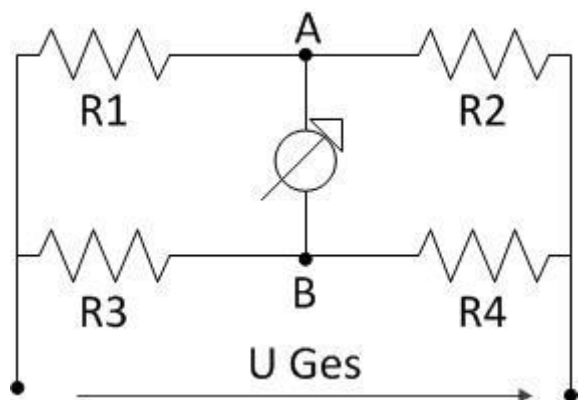
Der Messbereich des verwendeten Durchflussmessers für die ersten Versuche liegt bei 5-50 l/min, hingegen wird für höhere Volumenströme ein anderer Durchflussmesser gleicher Bauart mit einem Messbereich von 40-380 l/min verwendet. Der Anschluss des Durchflussmessers erfolgt in 2-Leitertechnik mit einer Versorgungsspannung von 24 V, wobei das Ausgangssignal 4-20 mA beträgt. Für die Verwendung eines Schwebekörperdurchflussmes-

ser im Teststand spricht die hohe Zuverlässigkeit aufgrund des einfachen mechanischen Systems und des langjährigen Einsatzes des Prinzips zur Durchflussmessung. Ebenso weisen Schwebekörperdurchflussmesser nur sehr geringe Druckverluste im Vergleich zu anderen Messverfahren wie Messblenden oder Zahnradzählern auf und beeinflussen somit den Druck im Testaufbau nicht negativ. Außerdem sind Schwebekörperdurchflussmesser im Gegensatz zu anderen Durchflussmessverfahren kostengünstiger, was ebenfalls für die Verwendung eines Schwebekörperdurchflussmessers spricht.

3.12 Drucksensor

Zur Ermittlung der Drücke des Methanstroms und des Luftstromes vor und hinter dem Receiver-Reaktor werden Druckmessumformer in die Zu- und Ableitungen der Ströme installiert. Für den Teststand werden die Druckmessumformer Midas C08 der Fa. Jumo verwendet, welche den Relativdruck messen. Diese sind für Temperaturbereiche von -20 °C bis $+125\text{ °C}$ und einem Druckbereich von 0-2,5 bar ausgelegt. Sie erzeugen bei der Umwandlung des Druckes ein Messsignal im Bereich von 4-20 mA [33]. Um die Druckmessumformer auch für die heißen Gasströme ($800\text{--}900\text{ °C}$) nach dem Receiver-Reaktor zu verwenden werden diese nicht direkt an den Hauptleitungen befestigt sondern über 1,2 m lange Edelstahlleitungen mit den Hauptleitungen verbunden. Durch diese Maßnahme sind die Druckmessumformer nicht direkt der Hitze ausgesetzt und können trotzdem den Druck messen. Ein weiterer Vorteil ist, dass kostengünstigere Messumformer für niedrigere Temperaturbereiche genutzt werden können. Der Druckbereich des Sensors ist mit max. 2,5 bar ebenfalls für den Teststand ausreichend, weil höhere Drücke zu einer Zerstörung der Glasscheibe am Receiver-Reaktor führen würden.

Die Drucksensoren nutzen für ihre Messung den piezoresistiven Effekt. Darunter versteht man die Änderung des Widerstandes eines Elementes unter Ausübung von Druck auf das Element. Dabei ändert sich nicht nur die Geometrie des Elementes, sondern auch die Kristallstruktur. Dieser Effekt lässt sich besonders gut bei den Materialien Silizium und Germanium feststellen. Für Drucksensoren werden piezoresistive Widerstände aus Silizium auf einer Membran aufgebracht. Die Widerstände werden zu einer Wheatstone Brücke (siehe Abbildung 3.12) verschaltet, daraus ergibt sich eine Gleichgewichtsbedingung die durch die Formel (3.3) und (3.4) beschrieben wird. Bei Veränderung der Widerstände kommt die Schaltung zwischen Punkt A und B aus dem aus dem Gleichgewicht, sodass ein Ausgleichstrom fließt. Der Strom bzw. die Potentialdifferenz wird gemessen und über Signalverstärker und Wandler wird das Ausgangssignal erzeugt.



$$\frac{R1}{R2} = \frac{R3}{R4} \quad (3.3)$$

Abbildung 3.12 Wheatstone Messbrücke

Die im Teststand verwendeten Drucksensoren werden in 2-Leitertechnik mit der Datenerfassung verbunden. Mit Hilfe eines OPC Servers und dem Programm LabVIEW werden die Daten erfasst und gespeichert. Die Umrechnung des Ausgabesignals des Sensors (4-20 mA) erfolgt durch die Formel (3.4).

$$p = p_{min} + \frac{p_{max} - p_{min}}{16mA} \times (I - 4mA) \quad (3.4)$$

p	Druck	0-2,5 bar
p_{min}	minimal messbarer Druck	0 bar
p_{max}	maximal messbarer Druck	2,5 bar
I	Stromstärke	max. 20 mA

3.13 Verwendete Chemikalien

Für den Teststand werden die in Tabelle 3.4 aufgelisteten Chemikalien verwendet. Für den Gaschromatographen erfüllen die Gase Ar und He besonders hohe Reinheitsgrade.

Name	Reinheitsgrad	Reinheit (%)
CO ₂	4,5	99,995
CH ₄	4,5	99,995
N ₂	4,5	99,995
H ₂	4,5	99,995
CO	4,8	99,998
Ar	5,0	99,9995
He	5,0	99,9995
H ₂ O	Destilliert für Verdampfer	

Tabelle 3.4 Verwendete Chemikalien im Teststand

4 Kommunikation und Erfassung der Mess- und Regelungstechnik im Teststand

Dieser Abschnitt der Arbeit bietet einen Überblick über das erstellte LabVIEW Programm zur Datenerfassung. Es wird beschrieben wie die einzelnen Messgrößen erfasst und die Regelgrößen eingestellt werden.

4.1 Grundlagen zu den verwendeten Komponenten

Wie im Kapitel 3 beschrieben werden im Teststand verschiedene Mess- und Regelungskomponenten verwendet. Um diese zu steuern und die Messdaten zu erfassen wird im grafischen Programmiersystem LabVIEW ein Programm für den Teststand geschrieben. Die Programmierung des Programms erfolgt nach dem Datenflussmodell in der grafischen Programmiersprache „G“ unter der Verwendung von Funktionsblöcken. Die Funktionsblöcke besitzen Ein- und Ausgänge und können mit Hilfe von Verbindungsdrähten verbunden werden. Funktionsblöcke können als Unterprogramme betrachtet werden, welche bestimmte Aufgaben abarbeiten. So können zum Beispiel reale Eingänge am Computer eingelesen werden oder auch Daten an externe Regelungstechnik übermittelt werden. Die Unterprogramme können dabei unterschiedlich tief verschachtelt sein. Eine große Anzahl an Funktionsblöcken steht bereits in der Bibliothek von LabVIEW zur Verfügung und kann für die Programmierung genutzt werden. Programme in LabVIEW bestehen im Wesentlichen aus zwei Komponenten: Im sogenannten Blockdiagramm erfolgt die eigentliche Programmierung mit den Funktionsblöcken, in der zweiten Komponente, dem Frontpanel erfolgt die Visualisierung des Programmcodes für den Anwender.

Für den Teststand werden über 50 Mess- und Regelungskomponenten verwendet. Diese besitzen verschiedene Schnittstellen und Ausgangssignale. Damit das LabVIEW Programm mit Komponenten kommunizieren und Daten erfassen kann, wird ein Adam 5000/TCP Module der Fa. Advantech verwendet. Dieses besitzt acht Steckplätze, in denen verschiedene Module für die Erfassung und Ausgabe von analogen und digitalen Signalen platziert werden können [34]. Das Adam 5000/TCP kommuniziert mit den Modulen in den Steckplätzen und überträgt die Daten per Ethernet an einen OPC-Server. Der OPC-Server wird durch den OPC Client, im Fall des Teststandes dem LabVIEW Programm, ausgelesen oder beschrieben. Wird der OPC-Server mit Daten beschrieben, werden diese an die anderen Module übertragen. Die Adam 5000/TCP Module befinden sich einem Schaltschrank und werden dort mit der erforderlichen Spannung von 24 V versorgt. Der Schaltschrank und die Adam Module können aus dem DLR Projekt Sothek, bei dem Wasserdampf durch konzentrierte Strahlung überhitzt wurde, wieder verwendet werden. Da in diesem Projekt ebenfalls zur Erfassung der Daten ein Programm in LabVIEW erstellt wurde, können Unterprogramme (Funktionsblöcke) insbesondere zur Kommunikation mit dem Adam Modul bzw. dem OPC-Server aus diesem Projekt wieder verwendet werden.

4.2 Erfassung und Verarbeitung der Messwerte der Thermoelemente

In Kapitel 3.7 wurden bereits die verwendeten Thermoelemente und die Platzierung im Absorber beschrieben. Um die Daten der Thermoelemente zu erfassen und darzustellen, werden fünf Adam 5018 Module in den Steckplätzen der Adam 5000/TCP Module platziert. Mit jedem der 5018 Module können Daten von sieben Thermoelementen erfasst werden [35]. Durch das Modul werden die Spannungen der Thermoelemente in einen ganzzahligen Temperaturwert umgewandelt und über das Adam 5000/TCP an den OPC-Server übertragen. Mit Hilfe eines für das Sothek-Projekt erstellten LabVIEW Unterprogramms können die Temperaturen vom OPC-Server abgefragt und weiter verarbeitet werden.

Um noch sieben weitere Thermoelemente zu erfassen, wird von der Fa. Advantech das USB-4718 Modul verwendet, welches per USB mit dem Messrechner verbunden wird. Durch die vom Hersteller zur Verfügung gestellte Funktionsblöcke, erfolgt die Erfassung im für den Teststand geschriebenen LabVIEW Programm.

Um eine Aussage über die Durchschnittstemperaturen der drei Thermoelementabschnitte im Absorber zu treffen (siehe Abbildung 3.9), werden diese mit dem arithmetischen Mittelwert der neun Thermoelemente über das Volumen und die Temperatur im LabVIEW Programm berechnet. Für die Berechnung werden die Thermoelementabschnitte in drei Bereiche unterteilt. Die Unterteilung der Bereiche ist in Abbildung 4.1 in rot, orange und gelb dargestellt.

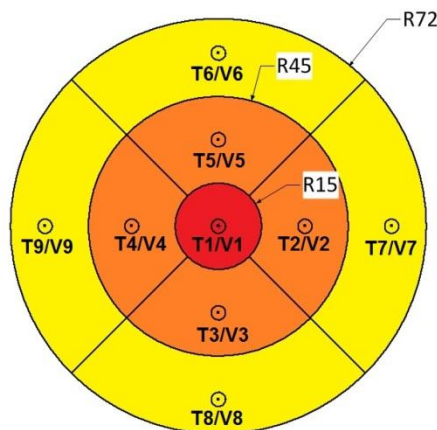


Abbildung 4.1 Einteilung der Abschnitte im Absorber für die Berechnung der Durchschnittstemperatur

Für die drei Bereiche wird der jeweilige Flächeninhalt berechnet. Die Berechnung der Flächen erfolgt nach den Formeln (4.1-4.3).

$$\text{Fläche rot} \quad A_r = 15^2 \times \pi \quad (4.1)$$

$$\text{Fläche orange} \quad A_o = (45^2 \times \pi) - A_r \quad (4.2)$$

$$\text{Fläche gelb} \quad A_g = (72^2 \times \pi) - (45^2 \times \pi) \quad (4.3)$$

Aus den ermittelten Flächeninhalten werden anschließend Volumina berechnet (Formel 4.4-4.6). Als Länge für den vorderen Abschnitt werden 52,5 mm verwendet, für den middle-

ren Abschnitt wird eine Länge von 92,5 mm und für den hinteren Abschnitt wird eine Länge von 55 mm verwendet.

$$\text{Volumen rote Fläche} \quad V_r = A_r \times l_A \quad (4.4)$$

$$\text{Volumen orange Fläche} \quad V_o = A_o \times l_A \quad (4.5)$$

$$\text{Volumen gelbe Fläche} \quad V_g = A_g \times l_A \quad (4.6)$$

Das Volumen der orangen und gelben Flächen wird durch vier dividiert, um für jedes Thermoelement ein Volumen zu erhalten. Die Berechnung der Durchschnittstemperatur eines Thermoelementabschnittes erfolgt nach den Formel (4.7). Das Blockdiagramm zur Berechnung der Durchschnittstemperatur der Absorberabschnitte wird in Abbildung 4.2 dargestellt.

$$\varnothing T_{Abs.} = \frac{V_1 \times T_1 + V_2 \times T_2 \dots V_9 \times T_9}{V_{Abs.}} \quad (4.7)$$

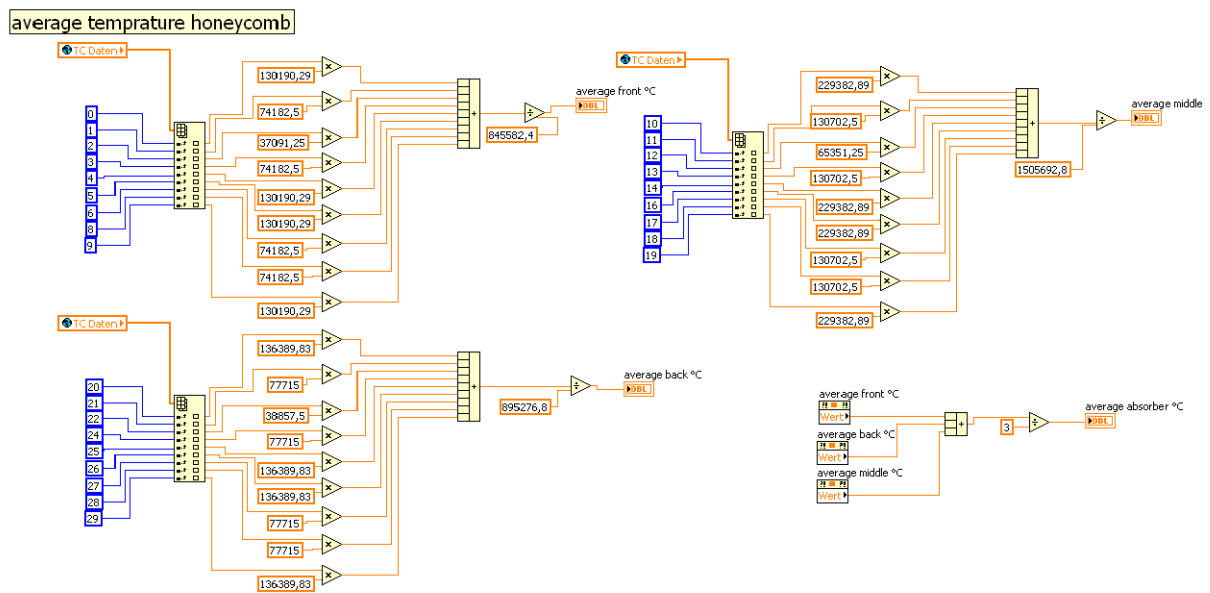


Abbildung 4.2 Blockdiagramm für die Berechnung der Durchschnittstemperatur im Absorber

In Abbildung 4.3 wird der Teil des Blockdiagramms dargestellt, welcher für die Abfrage und Darstellung der Temperatur zuständig ist. Bei dem Funktionsblock TC Daten handelt es sich um ein Teil des Unterprogramms, welches aus dem Sothek-Projekt übernommen wurde. In Abbildung 4.4 ist das Frontpanel für den Nutzer zu sehen. Hier werden die Temperaturen, die im Absorber gemessen und berechnet werden, dargestellt. Die Temperaturen werden dabei direkt in numerischen Anzeigen und in einem Signalverlaufsdigramm abgebildet. Zusätzlich wird dem Anwender die maximal gemessene Temperatur des Teststandes angezeigt. Sollte die Temperatur eines Thermoelements über 950 °C steigen, wechselt die Anzeige (oben rechts im Frontpanel) von der Farbe grün „OK“ in rot „to high“.

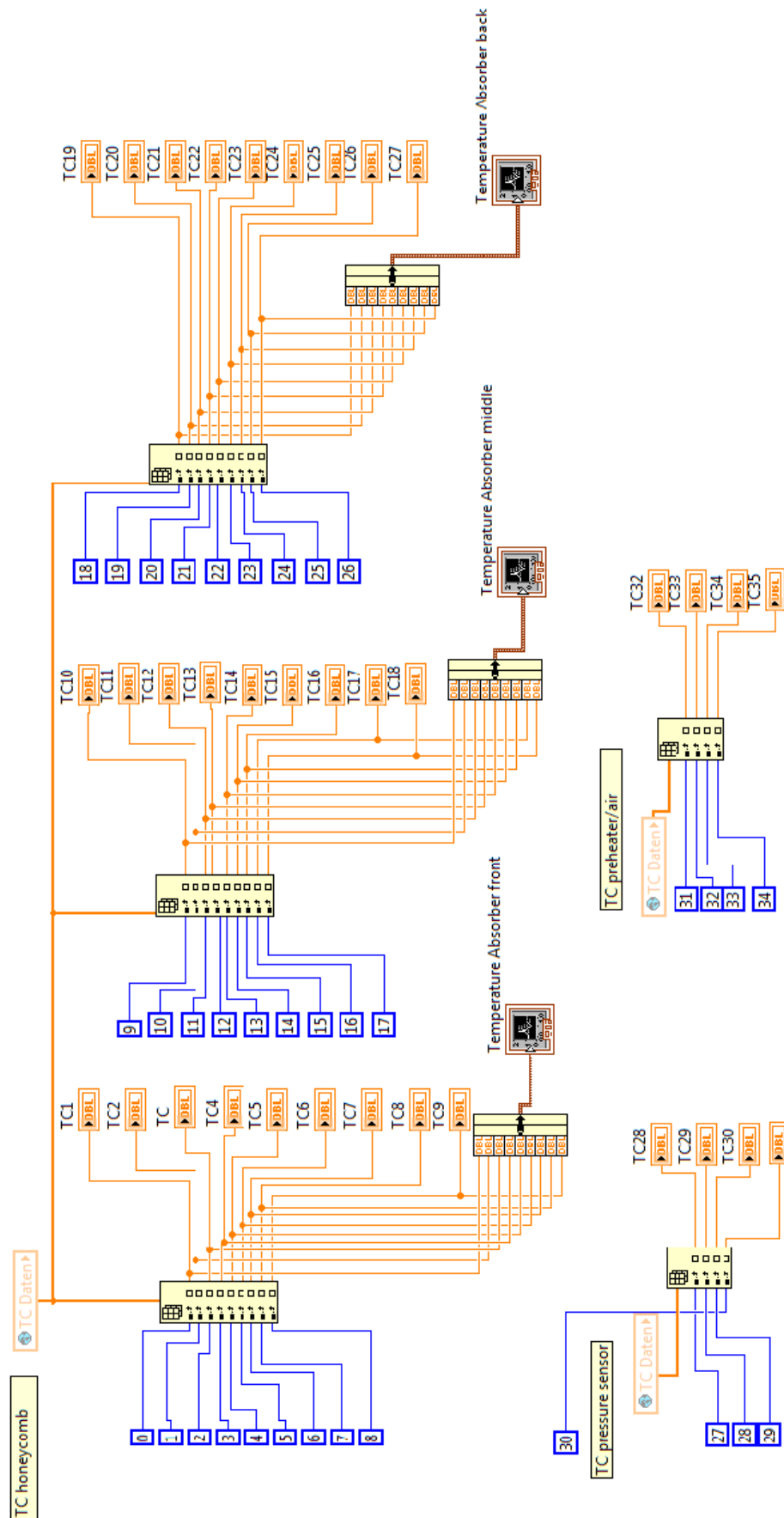


Abbildung 4.3 Blockdiagramm zur Temperaturerfassung

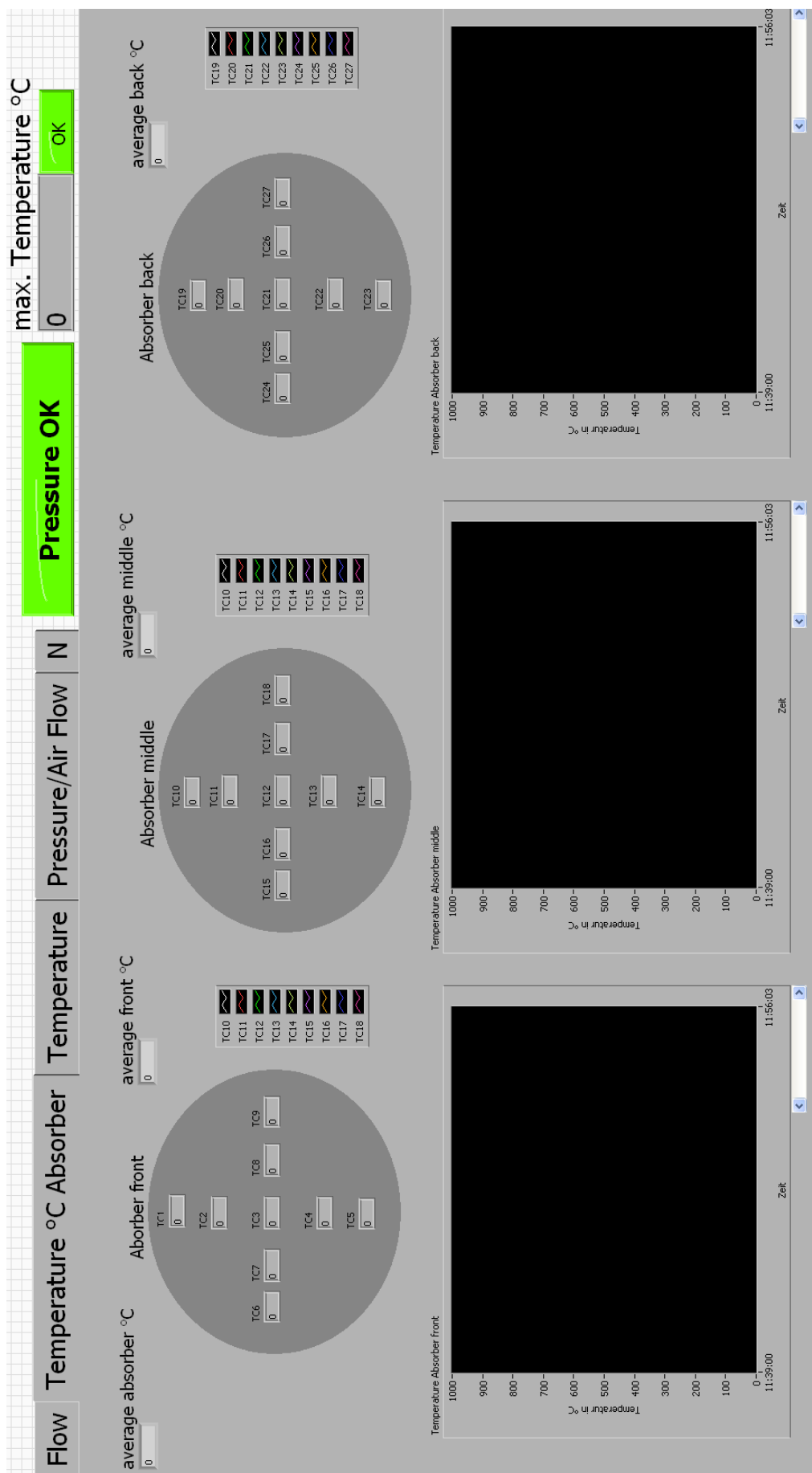


Abbildung 4.4 Frontpanel zur Darstellung der Temperaturen in der Wabe

4.3 Verarbeitung der Daten aus den Druckmessungen

Die verwendeten Druckumformer geben ein Signal von 4-20 mA aus. Um dieses Signal zu erfassen, wird ein Adam 5017 Modul mit acht Kanälen verwendet. Weil das verwendete Modul nur Spannungen und keine Ströme erfassen kann, wird in jeden der acht Kanäle ein Widerstand mit 124 Ohm eingesetzt. Das Modul kann durch den Widerstand und dem ausgegebenen Signal des Sensors eine Spannung erfassen. Die ermittelte Spannung wird dann an den OPC Server übermittelt.

Mit Hilfe des Unterprogramms AI Daten, welches ebenfalls aus dem Sothek Projekt stammt, können die ermittelten Werte durch LabVIEW Programm vom OPC-Server abgerufen werden. Die abgerufenen Werte sind dabei Spannungswerte und müssen über das ohmsche Gesetz in einen Strom umgerechnet werden. Der errechnete Strom wird dann in einen Druck umgerechnet, siehe Formel (3.4). In Abbildung 4.5 ist das entsprechende Blockdiagramm für die Druckmessung dargestellt. Zusätzlich zur Abfragung des Spannungssignal und der Umrechnung in den Druck, erfolgt eine Überprüfung der Druckhöhe. Sollte der Druck im Receiver-Reaktor über 2,5 bar absolut steigen, wird dem Anwender eine Warnsignal angezeigt, das in Abbildung 4.4 und Abbildung 4.6 oben rechts zu sehen ist. Sollte der Druck zu hoch sein wechselt die Anzeige von grün „Pressure OK“ in rot „Pressure to high!“.

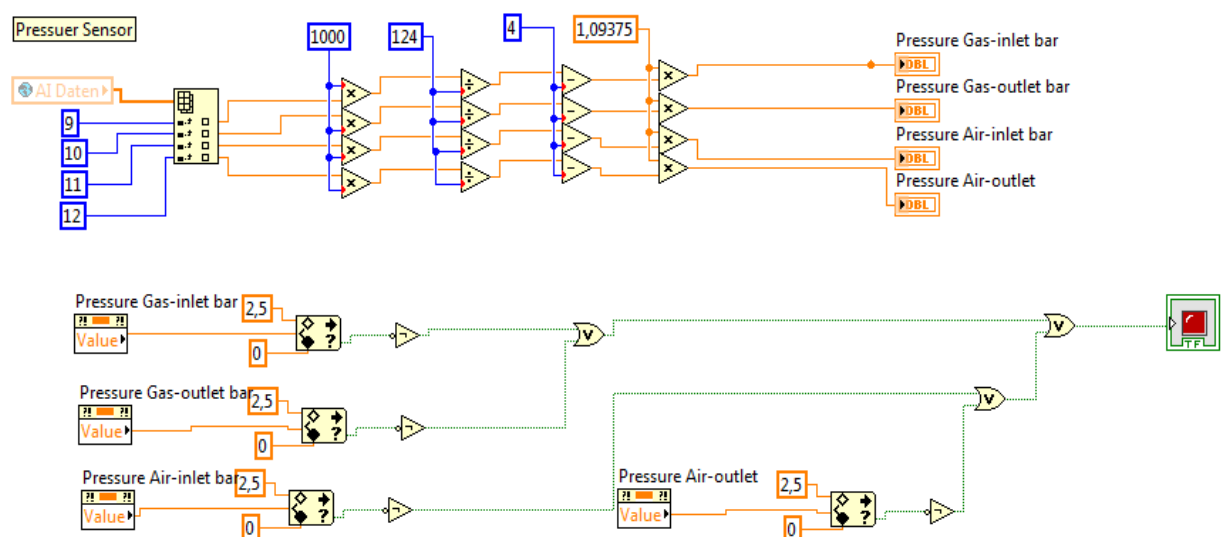


Abbildung 4.5 Blockdiagramm der Druckmessung und Drucküberwachung

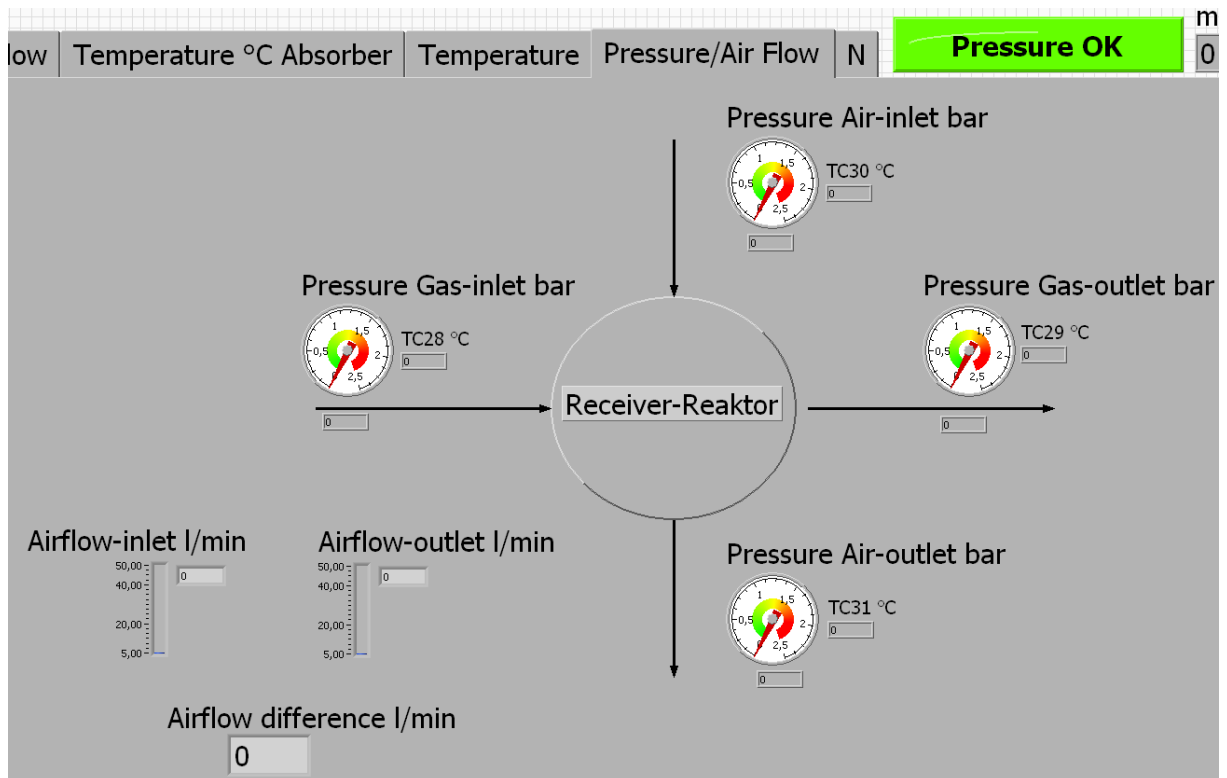


Abbildung 4.6 Frontpanel der Druckerfassung und Durchflussmessung

4.4 Verarbeitung der Daten der Durchflussmessung

Für die Erfassung des Signals der Durchflussmessung wird ebenfalls ein Adam 5017 Modul verwendet. Der Durchflussmesser gibt ein Signal von 4-20 mA aus, ebenso wie in Kapitel 4.3 beschrieben, wird das Messsignal des Durchflusssensors als Spannung vom Adam 5017 Modul erfasst und über das LabVIEW Programm in einen Durchflusswert umgerechnet. Des Weiteren ermittelt das LabVIEW Programm den Luftstrom vor dem Receiver-Reaktor und vergleicht den Wert mit dem des Durchflussmessers. Die ermittelten bzw. ausgewerteten Daten werden im Frontpanel angezeigt, siehe Abbildung 4.6. In der Abbildung 4.7 wird das Blockdiagramm der Durchflussmessung dargestellt.

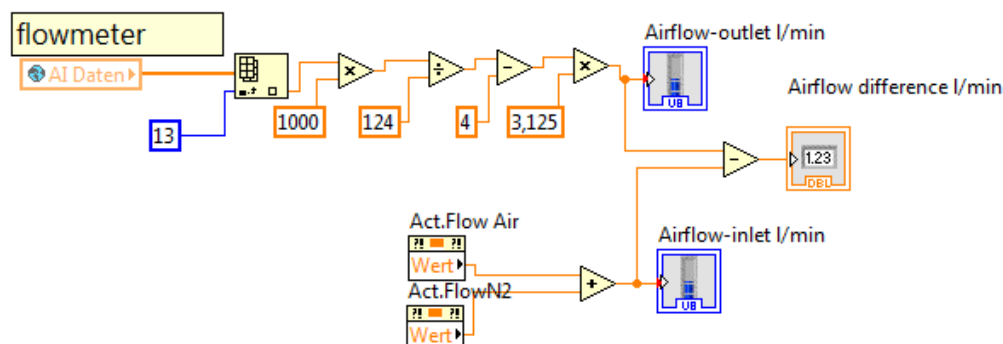


Abbildung 4.7 Blockdiagramm der Durchflussmessung

4.5 Kommunikation mit den Volumenstromreglern

Damit im Teststand die Volumenströme über ein LabVIEW Programm gesteuert und die Einstellungen gespeichert werden können, wird das MKS-647C Steuergerät mit Hilfe eines RS-232 Kabel mit dem Computer verbunden. Durch Funktionsblöcke, welche vom Hersteller des Steuergeräts stammen, kann das LabVIEW Programm mit dem Steuergerät kommunizieren. Über Eingabefunktionsblöcke können die Volumenströme und die Größe des Volumenstromreglers eingestellt werden. Ebenso wird über die Zustandsgleichung idealer Gase der Massenstrom der Gase berechnet, wie Formel (4.8) dargestellt. Als Temperaturwert werden die Temperaturen vor den Gaserhitzern und als Druckwerte die ermittelten Daten vom Receiver-Reaktor Eingang verwendet.

$$\dot{m} = \left(\frac{p \times \dot{V}}{R_M \times T} \right) \times M \quad (4.8)$$

\dot{m}	Massenstrom	(kg/s)
p	Druck	(kg/m s ²)
\dot{V}	Volumenstrom	(m ³ /s)
R_M	molare Gaskonstante	8,314 (J/mol K)
T	Temperatur	(K)
M	molare Masse	(kg/mol)

Da im Teststand sieben Volumenstromregler verwendet werden und somit sieben Kanäle des Steuergeräts abgefragt werden müssen, erfolgt die Abfrage der Kanäle in einer sogenannten gestapelten Sequenz. Durch die gestapelte Sequenz und durch die entsprechende Kanalzuweisung der Funktionsblöcke werden die Kanäle einzeln abgefragt bzw. mit Werten beschrieben. Um die gestapelte Sequenz herum ist eine Case-Struktur programmiert. Durch diese Schleife ist sichergestellt das die gestapelte Sequenz nur solange durchgearbeitet wird, wie das Programm läuft. Bei Abbruch oder Anhalten des Programms wird der Inhalt der Schleife nicht abgearbeitet. In Abbildung 4.8 ist das Blockdiagramm mit der gestapelten Sequenz, der Case-Struktur und die Abfrage für einen Kanal dargestellt. Das Frontpanel für die Ansteuerung der Volumenstromregler wird in Abbildung 4.9 gezeigt.

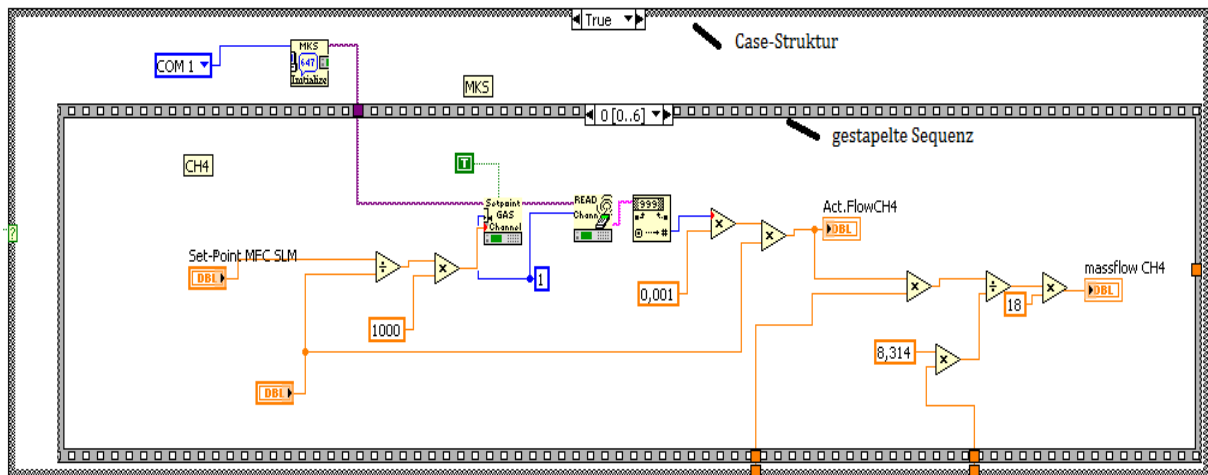


Abbildung 4.8 Blockdiagramm der Volumenstromregler

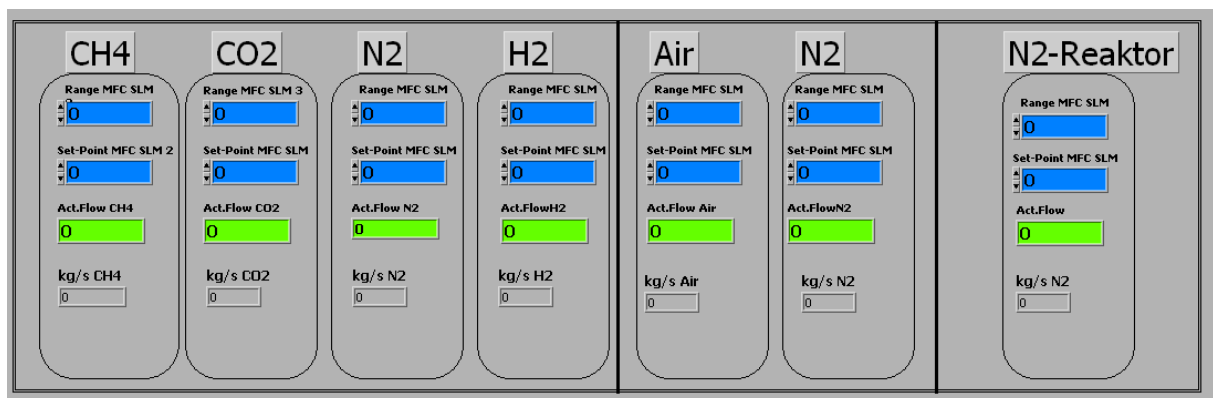


Abbildung 4.9 Frontpanel der Volumenstromregler

4.6 Anschluss des Verdampfers

Für die Erzeugung des Wasserdampfes wird der Verdampfer der Fa. ADROP verwendet. Er besteht hauptsächlich aus einem Heizelement mit dem das H₂O verdampft wird und einem PID-Regler der die Steuerung übernimmt. Der PID-Regler wird über ein RS-232 Kabel mit dem Messrechner verbunden. Außerdem wird der Verdampfer mit dem Schaltschrank für die nötige Spannungsversorgung verbunden. Für die Kommunikation und die Ansteuerung mit dem LABVIEW Programm kann eine Schleife mit den nötigen Funktionsblöcken aus dem Sothek Projekt genutzt werden. In Abbildung 4.10 ist das Blockdiagramm für den Verdampfer zu sehen.

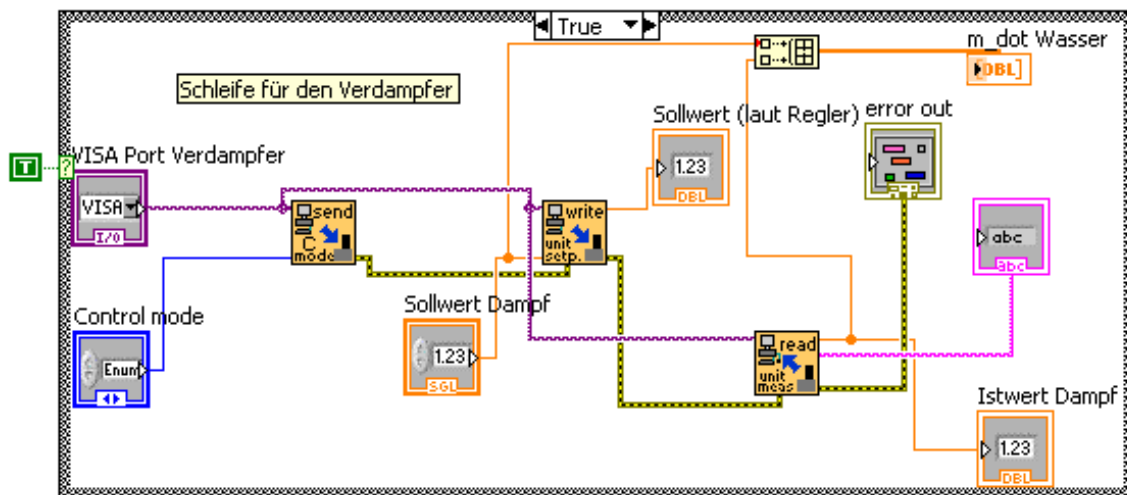


Abbildung 4.10 Blockdiagramm für den Verdampfer

4.7 Berechnung des thermischen Wirkungsgrades

Um eine Aussage über die Effizienz des Absorbers zu treffen, wird der thermische Wirkungsgrad n_{th} durch das LabVIEW Programm berechnet. Der Wirkungsgrad n_{th} gibt darüber Auskunft, wie viel der Strahlungsenergie des Sonnensimulators in Wärmeenergie umgewandelt wird. Anhand der Formel (4.9) kann der thermische Wirkungsgrad berechnet werden.

$$n_{th} = \frac{\dot{Q}_{Nutzen}}{\dot{Q}_{Strahlung}} \quad (4.9)$$

Der Wert für $\dot{Q}_{Strahlung}$ wird direkt durch das FATMES- Messsystem im Strahler berechnet und kann für die Berechnung des Wirkungsgrades per Tastatur in das LabVIEW Programm eingegeben werden. Allgemein wird der Wärmestrom \dot{Q} über die Formel (4.10) berechnet.

$$\dot{Q} = \dot{m} \times C \times (T_2 - T_1) \quad (4.10)$$

Bei Wärmeströmen mit konstanten Volumen (isochor) gilt für den spezifischen Wärmekoeffizienten $C = C_V$ und für Wärmeströme bei konstanten Druck (isobar) wird der spezifische Wärmekoeffizient C zu C_p . Da im Teststand die Volumenströme variieren und der Druck im Teststand konstant ist, wird der spezifische Wärmekoeffizient C_p verwendet. Um die verschiedenen spezifischen Wärmekapazitäten der Gase zu ermitteln, werden die C_p -Werte über die Formel (4.11) Temperaturabhängig berechnet.

$$Cp = \sum_{i=1}^n C(i) \times T^{P(i)} \quad (4.11)$$

Die Werte für $C(i)$ und $P(i)$ werden aus dem Programm FactSage entnommen und in das LabVIEW Programm implementiert. Als Temperatur wird der Mittelwert der Temperaturen des Methanstroms am Receiverausgang zum Receivereingang für die Gase CH_4 , CO_2 und H_2O verwendet. Für die Berechnung des Cp-Wertes der Luft, wird der Mittelwert der Temperaturen des Luftstroms am Receiverausgang zum Receivereingang verwendet. In Abbildung 4.11 ist das Blockdiagramm für die Berechnung des Cp-Wertes für CH_4 dargestellt.

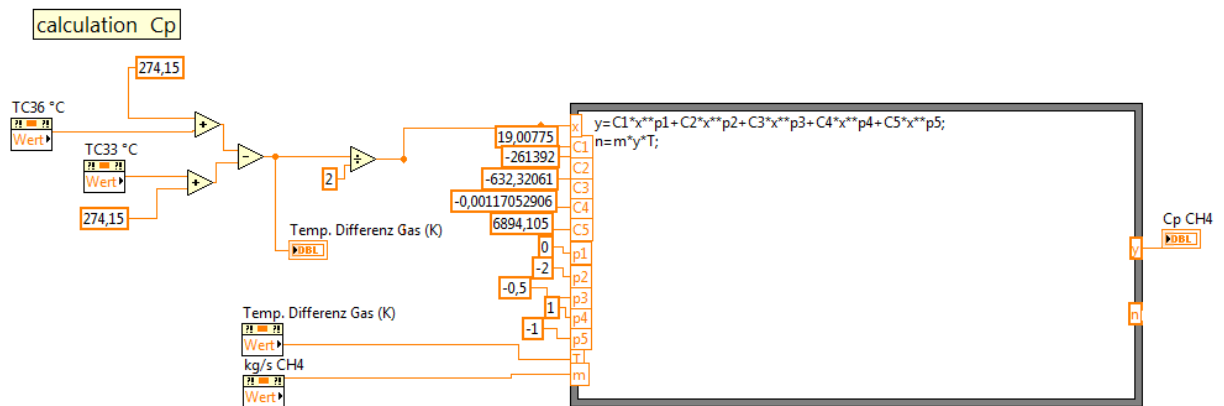


Abbildung 4.11 Berechnung eines Cp-Wertes im LabVIEW Programm

Die Berechnung von \dot{Q}_{Nutzen} erfolgt aus den ermittelten Temperatur, Drücken und Massenströmen im Teststand. Die genaue Berechnung von \dot{Q}_{Nutzen} erfolgt nach der Formel (4.12).

$$\dot{Q}_{Nutzen} = (\dot{m}_{\text{CH}_4} Cp_{\text{CH}_4} + \dot{m}_{\text{CO}_2} Cp_{\text{CO}_2} + \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} Cp_{\text{H}_2\text{O}}) \times (T_2 - T_1) + (\dot{m}_{\text{Luft}} Cp_{\text{Luft}}) \times (T_4 - T_3) \quad (4.12)$$

\dot{m}_{CH_4}	Massenstrom CH_4
\dot{m}_{CO_2}	Massenstrom CO_2
$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}$	Massenstrom H_2O
\dot{m}_{Luft}	Massenstrom Luft
Cp_{CH_4}	Spezifische Wärmekapazität CH_4
Cp_{CO_2}	Spezifische Wärmekapazität CO_2
$Cp_{\text{H}_2\text{O}}$	Spezifische Wärmekapazität H_2O
Cp_{Luft}	Spezifische Wärmekapazität Luft
T_1	Temperatur Methanstrom Receiver-Reaktoreingang
T_2	Temperatur Methanstrom Receiver-Reaktorausgang
T_3	Temperatur Luftstrom Receiver-Reaktoreingang
T_4	Temperatur Luftstrom Receiver-Reaktorausgang

4.8 Speicherung der erfassten Daten des ContiSol Teststandes

Damit die Daten, welche während eines Versuches erfasst werden, für spätere Analysen und Berechnungen genutzt werden können, werden diese durch das LabVIEW Programm alle fünf Sekunden gespeichert. Die Speicherung der Daten erfolgt über die gesamte Laufzeit sowie bei jeder Anwendung des Programms. Dadurch ist sichergestellt, dass dem Anwender keine Messdaten oder Einstellungen während des Versuches verloren gehen. Für die Speicherung erzeugt das Programm beim Start ein Textfile in dem die Uhrzeit, Temperaturen, Volumenströme, Massenströme, Drücke, Durchflüsse und der Wirkungsgrad gespeichert werden. Der Speicherort des Textfiles kann vom Anwender im Frontpanel ausgewählt werden. Als Quelle für die zu speichernden Daten werden die Anzeigeelemente verwendet. Da eine direkte Verbindung über einen Draht vom Anzeigeelement bis zum Abschnitt der Datenspeicherung zu unübersichtlich ist, wird mit den sogenannten Eigenschaftsknoten der Anzeigeelemente gearbeitet. Ein Eigenschaftsknoten kann als Pointer angesehen werden. Er zeigt also auf einen Speicherort mit dessen Wert gearbeitet werden soll. Das erzeugte Textfile kann anschließend durch Programme wie MATLAB oder Excel weiter analysiert werden.

5 Abschätzung der Messungenauigkeit im Teststand

Im Teststand werden an unterschiedlichen Stellen verschiedene Messungen zur Ermittlung der Temperatur, Volumenströme und der Drücke durchgeführt. Solchen Messungen haften immer Messungenauigkeiten an, welche die späteren Ergebnisse beeinflussen. Zur Ermittlung der Messungenauigkeiten, wird der Leitfaden GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) [36] [37] benutzt. In diesem Leitfaden werden zwei Methoden zur Ermittlung der Messungenauigkeit beschrieben. In Methode A wird die Messunsicherheit durch statistische Analyse der Messung berechnet. In der Methode B werden zur Berechnung der Messunsicherheit die Unsicherheitsbeiträge der Messgeräte verwendet.

Die Messungenauigkeit im Teststand wird vor Versuchsbeginn ermittelt, somit liegen noch keine Ergebnisse zur statistischen Analyse der Messergebnisse vor. Daher wird Methode B nach dem GUM zur Abschätzung der Messungenauigkeit verwendet. Die Messergebnisse setzen sich im Versuch aus verschiedenen Eingangsgrößen mit unterschiedlichen Messunsicherheiten σ_i ($i = 1 \dots N$) zusammen. Diese Messunsicherheiten werden als einfache Standardabweichung geometrisch addiert, siehe Formel (5.1).

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \dots + \sigma_n^2} \quad (5.1)$$

Das Vertrauensniveau der Messunsicherheit beträgt damit 68,3% was bedeutet, dass bei einer Wiederholungsmessung die Wahrscheinlichkeit 68,3% beträgt, einen Wert in diesem Intervall zu messen. Wird der Wert mit der erweiterten Messunsicherheit $k=2$ multipliziert, ergibt sich ein Intervall mit einem Vertrauensniveau von 95%.

Weil in den Datenblättern der Messgeräte häufig nur Toleranzintervalle und keine Verteilungen angegeben sind, muss eine Rechteckverteilung angenommen werden. Bei einer Rechteckverteilung wird die Messunsicherheit durch $\sqrt{3}$ dividiert. Bei Angaben zur Linearität wird die Messunsicherheit durch 2 dividiert.

5.1 Messungenauigkeit der Temperaturerfassung

Im Teststand werden Thermoelemente des Typ K verwendet. Diese haben nach DIN EN 60 584 eine Grenzabweichung für die Toleranzklasse 2 im Temperaturbereich -40 bis +333 °C von $\pm 2,5$ °C [29] und im Temperaturbereich von 333 °C bis 1200 °C eine Abweichung von $0,0075 \times |t|$ [29]. Für die Berechnung wird beispielsweise eine Temperatur von 900 °C angenommen, woraus eine Messabweichung für die Temperatur des Thermoelements von $\pm 6,75$ °C folgt. Die Messabweichung für die Ausgleichsleitung beträgt $\pm 2,5$ °C. Für die Messabweichung der Erfassungshardware Adam 5018 wird eine Abweichung von $\pm 0,1\%$ angegeben [35], was bei einer Temperatur von 900 °C eine Abweichung von $\pm 0,9$ °C bedeutet. In Tabelle 5.1 werden die Ergebnisse aufgrund ihrer Verteilung als Unsicherheitsbeitrag dargestellt.

Größe x_i	Quelle	Verteilung	Unsicherheitsbeitrag
σ_M	Abweichung zur DIN	Rechteck	$\frac{\pm 6,75 \text{ }^{\circ}\text{C}}{\sqrt{3}} = \pm 3,90 \text{ }^{\circ}\text{C}$
σ_{Vlx}	Abweichung Ausgleichsleitung	Rechteck	$\frac{\pm 2,5 \text{ }^{\circ}\text{C}}{\sqrt{3}} = \pm 1,44 \text{ }^{\circ}\text{C}$
σ_H	Abweichung der Hardware	Rechteck	$\frac{\pm 0,9 \text{ }^{\circ}\text{C}}{\sqrt{3}} = \pm 0,52 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Tabelle 5.1 Berechnung der Messungenauigkeit der Temperaturerfassung

Nach der geometrischen Addition der Unsicherheitsbeiträge kommt eine Abweichung von $\pm 5,86 \text{ }^{\circ}\text{C}$ zustande. Für eine erweiterte Messunsicherheit ergibt sich mit $k=2$ eine Abweichung von $\pm 11,72 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Diese Rechnung wird für den Temperaturbereich von 0-1000 $^{\circ}\text{C}$ durchgeführt, wie die Ergebnisse in Abbildung 5.1 grafisch zeigen.

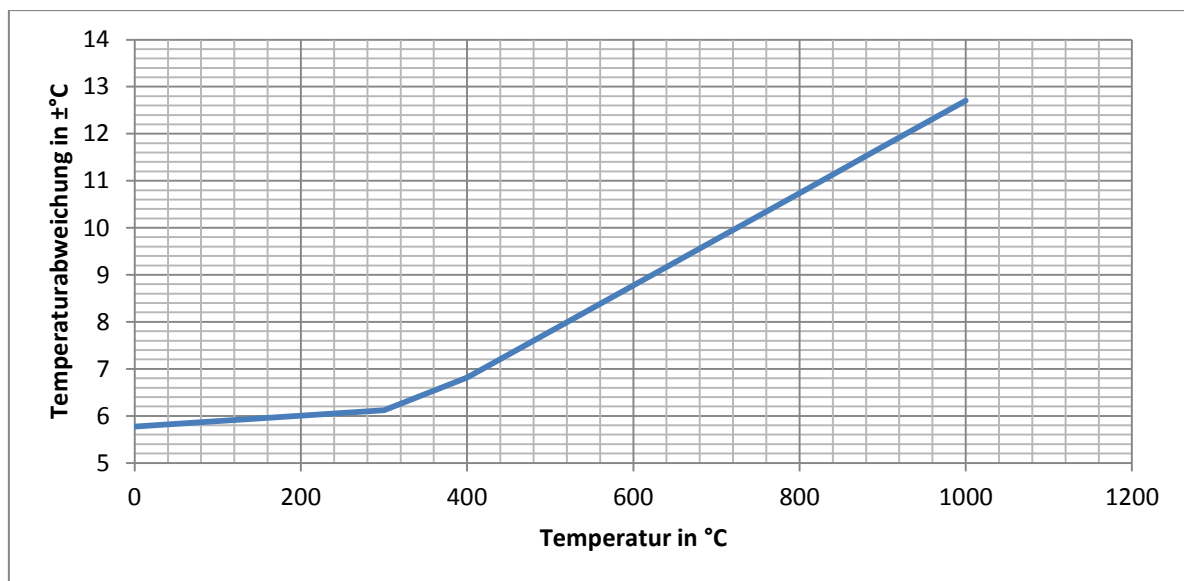


Abbildung 5.1 Messungenauigkeit der Temperaturerfassung

5.2 Messungenauigkeit der Druckerfassung

Der Messumformer C08 hat in einem Temperaturbereich von 20-125 $^{\circ}\text{C}$ eine Messabweichung von $\pm 1\%$, was für einen angenommen Messwert von 1,5 bar eine Abweichung von $\pm 0,015 \text{ bar}$ bedeutet [33]. Der Druckmessumformer besitzt laut Datenblatt eine Linearität von $\pm 0,25\%$ vom Messwert. Hieraus ergibt sich eine Messunsicherheit, bei der Annahme mit 1,5 bar, von $\pm 0,0037 \text{ bar}$. Die Langzeitstabilität des Messumformers ist mit $\pm 0,2\%$ vom Messwert pro Jahr angegeben [33], woraus sich ergibt, dass der Messunsicherheitsanteil $\pm 0,003 \text{ bar}$ für einen Druck von 1,5 bar lautet. Bei der Berechnung wird angenommen, dass der Messumformer ein Jahr alt ist.

Die Messwerterfassungshardware besitzt eine Genauigkeit von $\pm 0,2\%$ [38], was bei einem Messwert von 1,5 bar einem Messsignal von 13,5 mA entspricht, dass zu einer Ungenauigkeit von $\pm 0,027 \text{ mA}$ bei der Erfassungshardware führt. Bei einer Empfindlichkeit von

6,4 mA/bar entspricht dies $\pm 0,0024$ bar. Die Empfindlichkeit errechnet sich aus dem max. Ausgangssignal mit 16 mA durch den Messwert von 2,5 bar. In Tabelle 5.2 sind die Ergebnisse der Unsicherheitsbeiträge zusammen gefasst dargestellt.

Größe x_i	Quelle	Verteilung	Unsicherheitsbeitrag
σ_M	Abweichung Messumformer	Rechteck	$\frac{\pm 0,015 \text{ bar}}{\sqrt{3}} = \pm 0,0086 \text{ bar}$
σ_{LI}	Abweichung Linearität	Normal	$\frac{\pm 0,0037 \text{ bar}}{2} = \pm 0,0018 \text{ bar}$
σ_{LZ}	Abweichung Langzeitstabilität	Rechteck	$\frac{\pm 0,003 \text{ bar}}{\sqrt{3}} = \pm 0,0017 \text{ bar}$
σ_H	Abweichung des Hardware	Rechteck	$\frac{\pm 0,004 \text{ bar}}{\sqrt{3}} = \pm 0,0024 \text{ bar}$

Tabelle 5.2 Messungenauigkeit der Druckerfassung

Nach der geometrischen Addition ergibt sich eine Messabweichung des Druckes bei 1,5 bar von $\pm 0,014$ bar. Für eine erweiterte Messunsicherheit mit $k=2$ ergibt sich ein Messabweichung von $\pm 0,029$ bar. Diese Rechnung wurde für den Druckbereich von 0-2,5 bar durchgeführt und wird in Abbildung 5.2 dargestellt.

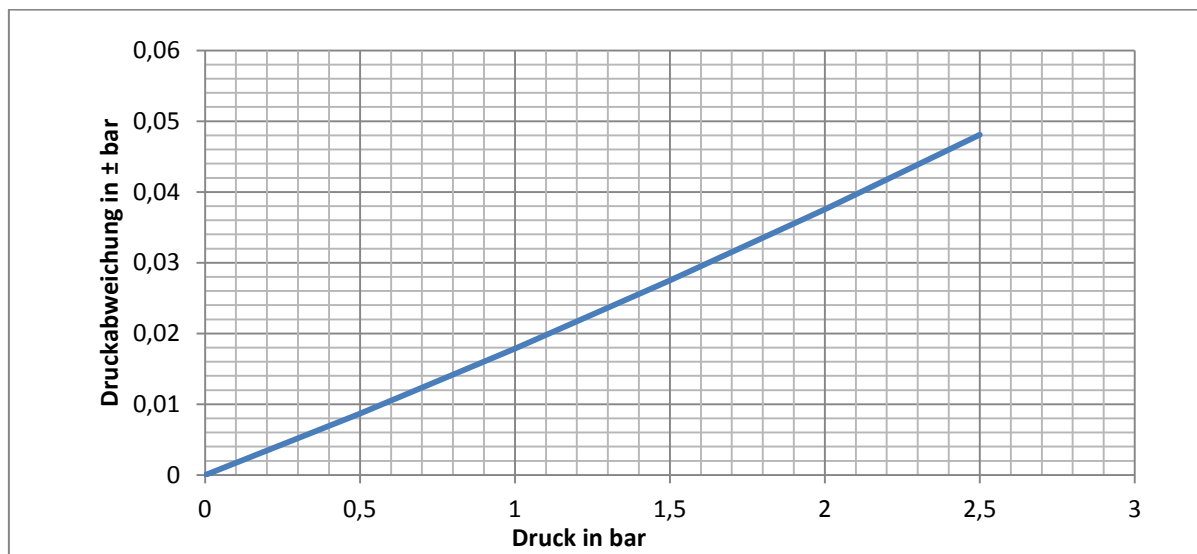


Abbildung 5.2 Messungenauigkeit der Druckerfassung

5.3 Messungenauigkeit des Durchflussmessers

Der verwendete Durchflussmesser hat laut Datenblatt eine Genauigkeit von $\pm 1,6\%$ vom Endwert. Bei einem Durchfluss von 50 l/min ergibt sich eine Messabweichung von $\pm 0,8$ l/min. Die Linearität vom Skalenendwert beträgt $\pm 0,2\%$. Der Durchflussmesser besitzt eine Skala von 5-50 l/min., was eine Linearitätsabweichung von $\pm 0,1$ l/min ergibt. Die Abweichung, welche durch Spannungsschwankungen verursacht wird, beträgt $\pm 0,1\%$ vom Endwert und liegt bei $\pm 0,05$ l/min. Durch den Gleichstrom am Ausgangssignal wird eine Abweichung von $\pm 0,15\%$ vom Skalenendwert verursacht. Für den verwendeten Durch-

flussmesser ergibt dies eine Abweichung von $\pm 0,075$ l/min. Die Langzeitstabilität ist laut Datenblatt mit $\pm 0,2\%$ vom Skalenendwert [39] angegeben und beträgt somit $\pm 0,1$ l/min. Die Messhardware hat einen Messfehler $\pm 0,2\%$, was bei einem Messwert von 50 l/min und einem Messsignal von 16mA einer Abweichung von 0,032 mA entspricht. Aus der Empfindlichkeit ergibt sich ein Messfehler von $\pm 0,01$ l/min. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse befindet sich in Tabelle 5.3.

Größe x_i	Quelle	Verteilung	Unsicherheitsbeitrag
σ_M	Abweichung Messumformer	Rechteck	$\frac{\pm 0,8 \text{ l/min}}{\sqrt{3}} = \pm 0,46 \text{ l/min}$
σ_{LI}	Abweichung Linearität	Normal	$\frac{\pm 0,1 \text{ l/min}}{2} = \pm 0,05 \text{ l/min}$
σ_V	Abweichung Spannungsversorgung	Rechteck	$\frac{\pm 0,05}{\sqrt{3}} = \pm 0,028 \text{ l/min}$
σ_{AC}	Abweichung Ausgangssignal	Rechteck	$\frac{\pm 0,075}{\sqrt{3}} = \pm 0,043 \text{ l/min}$
σ_{LZ}	Abweichung Langzeitstabilität	Rechteck	$\frac{\pm 0,1 \text{ l/min}}{\sqrt{3}} = \pm 0,05 \text{ l/min}$
σ_H	Abweichung des Hardware	Rechteck	$\frac{\pm 0,125 \text{ l/min}}{\sqrt{3}} = \pm 0,072 \text{ l/min}$

Tabelle 5.3 Messungenauigkeit des Durchflussmessers

Durch die geometrische Addition ergibt sich eine Messabweichung von $\pm 0,71$ l/min. Mit einer erweiterten Messunsicherheit $k=2$ ergibt sich ein Fehler von $\pm 1,42$ l/min. Diese Rechnung wird für einen Messbereich von 5-50 l/min durchgeführt und ist in Abbildung 5.3 zu sehen.

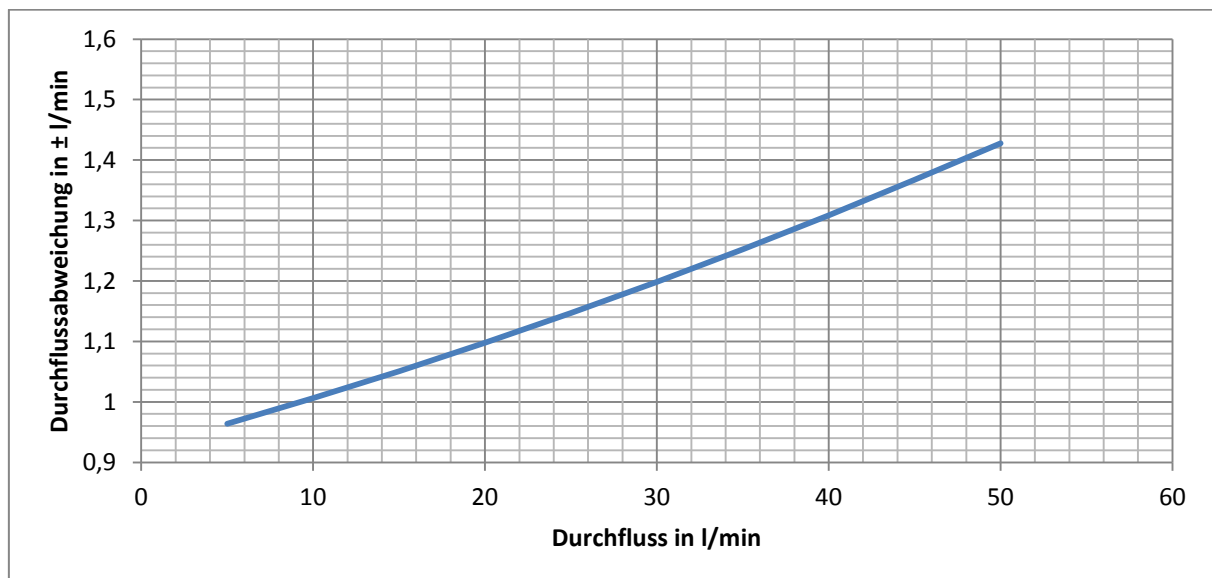


Abbildung 5.3 Messungenauigkeit des Durchflussmessers

5.4 Fehlerfortpflanzung des thermischen Wirkungsgrades

Der thermische Wirkungsgrad n_{Th} wird aus verschiedenen Messgrößen wie Temperatur, Druck und Volumenstrom berechnet. Diese Messgrößen sind jedoch, wie Eingangs des Kapitels beschrieben, mit gewissen Messungenauigkeiten behaftet. Aufgrund dieser Messungenauigkeiten weist auch der berechnete Wirkungsgrad eine Ungenauigkeit auf. Um diese Ungenauigkeit zu bestimmen wird der Fehler nach Gauß berechnet. Der Fehler nach Gauß wird durch die Formel (5.2) berechnet.

$$\Delta f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x} \times \Delta x\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \times \Delta y\right)^2 + \dots} \quad (5.2)$$

Wird der thermische Wirkungsgrad n_{th} , siehe Formel (4.9), partiell abgeleitet und in die Formel (5.2) eingesetzt, ergibt dies Formel (5.3) um die Abweichung des Wirkungsgrades zu bestimmen.

$$\Delta n_{th} = \sqrt{\left(\frac{1}{Q_{Strahlung}} \times \Delta Q_{Nutzen}\right)^2 + \left(\frac{Q_{Nutzen}}{Q_{Strahlung}^2} \times \Delta Q_{Strahlung}\right)^2} \quad (5.3)$$

Für $\Delta Q_{Strahlung}$ kann als Messungenauigkeit 3,5% vom Strahlungswert angenommen werden. Für die Bestimmung von ΔQ_{Nutzen} sind jedoch umfangreichere Rechnungen notwendig. Zunächst wird die Formel (4.12) für ΔQ_{Nutzen} nach den unterschiedlichen Massenströmen und Temperaturen abgeleitet und in die Formel (5.2) eingesetzt, was zur Formel (5.4) führt.

$$\Delta Q_{Nutzen} = \sqrt{\begin{aligned} &((\dot{m}_1 c p_1 + \dot{m}_2 c p_2 + \dot{m}_3 c p_3) \times \Delta T_1)^2 + \\ &((\dot{m}_1 c p_1 + \dot{m}_2 c p_2 + \dot{m}_3 c p_3) \times \Delta T_2)^2 + \\ &((T_2 - T_1) \times c p_1 \times \Delta \dot{m}_1)^2 + \\ &((T_2 - T_1) \times c p_2 \times \Delta \dot{m}_2)^2 + \\ &((T_2 - T_1) \times c p_3 \times \Delta \dot{m}_3)^2 + \\ &((T_4 - T_3) \times c p_4 \times \Delta \dot{m}_4)^2 + \\ &((\dot{m}_4 c p_4) \times \Delta T_3)^2 + \\ &((\dot{m}_4 c p_4) \times \Delta T_4)^2 \end{aligned}} \quad (5.4)$$

Um $\Delta \dot{m}$ zu bestimmen wird die Formel (5.5) partiell nach dem Druck, Volumenstrom und der Temperatur abgeleitet und in Formel (5.2) eingesetzt. Diese Vorgehensweise wird für alle Koeffizienten von $\Delta \dot{m}$ angewendet. In Formel (5.6) ist das Ergebnis der Rechnung dargestellt.

$$\dot{m} = \left(\frac{p \times \dot{V}}{R_M \times T} \right) \times M \quad (5.5)$$

$$\Delta \dot{m}_1 = \sqrt{\left(\frac{\dot{V}_1 \times M_1}{R \times T_1} \times \Delta p_1 \right)^2 + \left(\frac{p_1 \times M_1}{R \times T_1} \times \Delta \dot{V}_1 \right)^2 + \left(\frac{p_1 \times M_1}{R \times T_1} \times \Delta T_1 \right)^2} \quad (5.6)$$

Für ΔT und Δp können die berechneten Messungenauigkeiten aus Kapitel 5.1 und 5.2 verwendet werden. Als Messungenauigkeit für den Volumenstrom $\Delta \dot{V}$ kann eine Messungenauigkeit von $\pm 1\%$ [40] für den Einstellwert am Regler angenommen werden. Im Anhang A. ist eine Beispielrechnung für die Fehlerfortpflanzung des thermischen Wirkungsgrades durchgeführt.

6 Kalibrierung der Messgeräte und Vorversuche

6.1 Kalibrierung des Gaschromatographen (GC)

Um mit dem Gaschromatographen nicht nur eine Aussage über die Zusammensetzung sondern auch über die genaue Konzentration der Gase im Gemisch zu treffen, werden Kalibriergeraden erstellt. Dafür wird der Gaschromatograph mit bekannten Konzentrationen von Gasen in einer Stickstoffatmosphäre durchströmt. Der GC misst diese Konzentrationen und gibt diese in Form von Flächen in einem Graph (Chromatogramm) wieder. Die ausgegebenen Flächen des Chromatogramms werden in einem Graph in Excel gegen die Konzentration aufgetragen. Aus den erhaltenen Messwerten lässt sich durch lineare Regression eine Gerade berechnen. Mit den erstellten Geraden lassen sich im Teststand die Konzentrationen der einzelnen Gase im produzierten Synthesegas berechnen. In der Abbildung 6.1 ist als Beispiel eine Kalibriergerade für Kohlenmonoxid dargestellt. Für den Teststand werden Konzentrationen zwischen 5-30% für Kohlenmonoxid angenommen. Die Erstellung solcher Kalibriergeraden erfolgt für die Gase CO, CO₂, CH₄ und H₂.

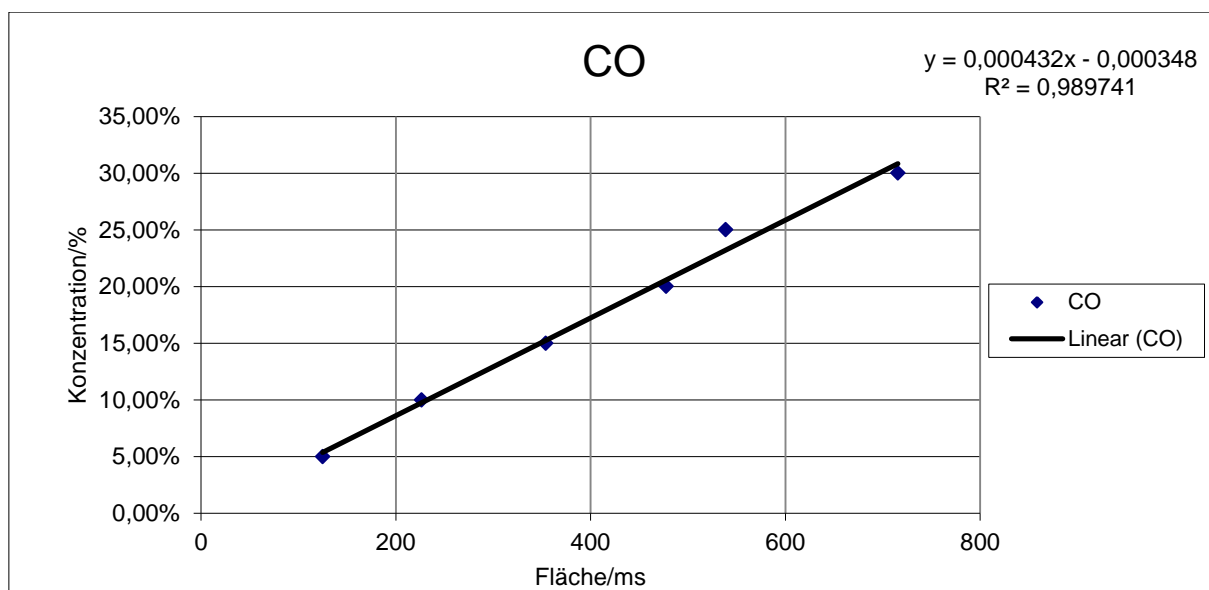


Abbildung 6.1 CO Kalibriergerade

6.2 Kalibrierung der Volumenstromregler

Die Kalibrierung der Volumenstromregler erfolgt mit dem Kalibriergerät Definier 220, der Fa. DrayCal. Als Messprinzip wird die Volumenverdrängung verwendet. Im Gerät befindet sich ein Zylinder mit einem Kolben der im Zylinder bei einer Kalibriermessung durch das Gas nach oben befördert wird. Die dafür benötigte Zeit wird im Verhältnis zum Volumen des Zylinders gesetzt, woraus das Gerät den Volumenstrom errechnet. Zur Erhöhung der Messgenauigkeit wird das arithmetische Mittel von zehn Messungen verwendet. In Tabelle 6.1 ist ein Beispiel für eine Kalibrierung eines Massenflussreglers abgebildet.

\dot{V} Kalibriergerät (sccm)	\dot{V} Volumenstromregler (sccm)
90	80,5
80	71
60	54
40	35,5
20	17,5

Tabelle 6.1 Abweichung der Volumenströme zwischen Kalibriergerät und Volumenstromregler

Für den Teststand stehen leider nur Kalibriergeräte bis zu einer Größe von 30.000 sccm zu Verfügung. Um die Messfehler auch für die im Teststand verwendeten größeren MFR abzuschätzen, siehe Tabelle 3.1, werden diese bis 30.000 sccm kalibriert. Aus den Ergebnissen werden mithilfe der linearen Regression Geraden erstellt, mit denen auch größere Einstellwerte errechnet werden können.

6.3 Vorversuche Gaserhitzer Methanstrom

Um Aussagen über das Heizverhalten des Gaserhitzers zu treffen, wird dieser in einem Vorversuch in einer Abzugshaube getestet. Dazu wird der Gaserhitzer mit verschiedenen Stickstoffvolumenströmen von 1-50 slm durchlaufen. Der Volumenstrom wird mit einem Volumenstromregler der Fa. MKS gesteuert. Die Ansteuerung des Volumenstromreglers erfolgt über die Software LabVIEW und dem MKS 647C Steuergerät. Um die Temperatur des Gases am Ein- und Ausgang des Gaserhitzer zu ermitteln, werden Thermoelemente des Typs K mit der Erfassungshardware der Fa. Advantech USB-4718 verbunden. Des Weiteren werden Thermoelemente des Typs K am Edelstahlrohr sowie an der Abzugshaube befestigt und ebenfalls mit dem USB-4718 verbunden. Die erfassten Temperaturen werden mit der Software LabVIEW protokolliert und in ein Textfile gespeichert. Der erhitzte N_2 wird durch den Abzug in die Umwelt geleitet. In der Abbildung 6.2 ist der prinzipielle Aufbau des Versuches dargestellt.

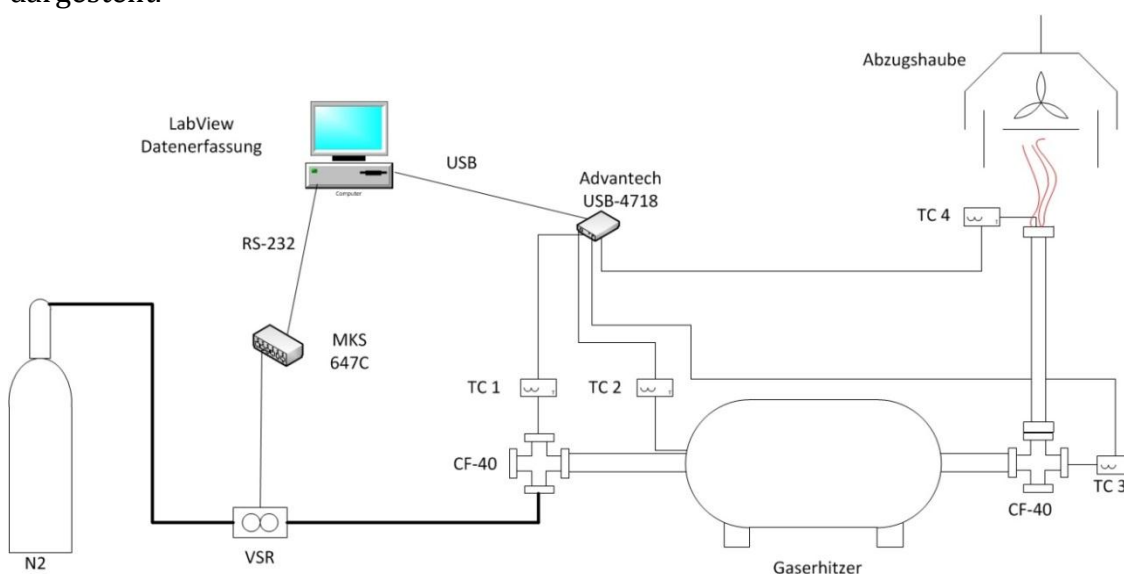


Abbildung 6.2 Aufbau Vorversuch Gaserhitzer

Für den ersten Test wird das Edelstahlrohr mit zwei Metallblechen befüllt, welche die Innenwand des Rohres berühren. Durch diese Maßnahme wird die Oberfläche der erhitzbaren Fläche vergrößert und es kann mehr Wärme über das Metallrohr an das Gas übertragen werden. Ziel des ersten Versuches ist es, dass Gas möglichst stark zu erhitzen. Dabei wird der Rohrofen auf 900 °C erhitzt und der Volumenstrom des Gases zwischen 1-50 slm variiert. In der Abbildung 6.3 ist eine Übersicht über die verschiedenen getesteten Volumenströme und die dabei erreichten Temperaturen dargestellt.

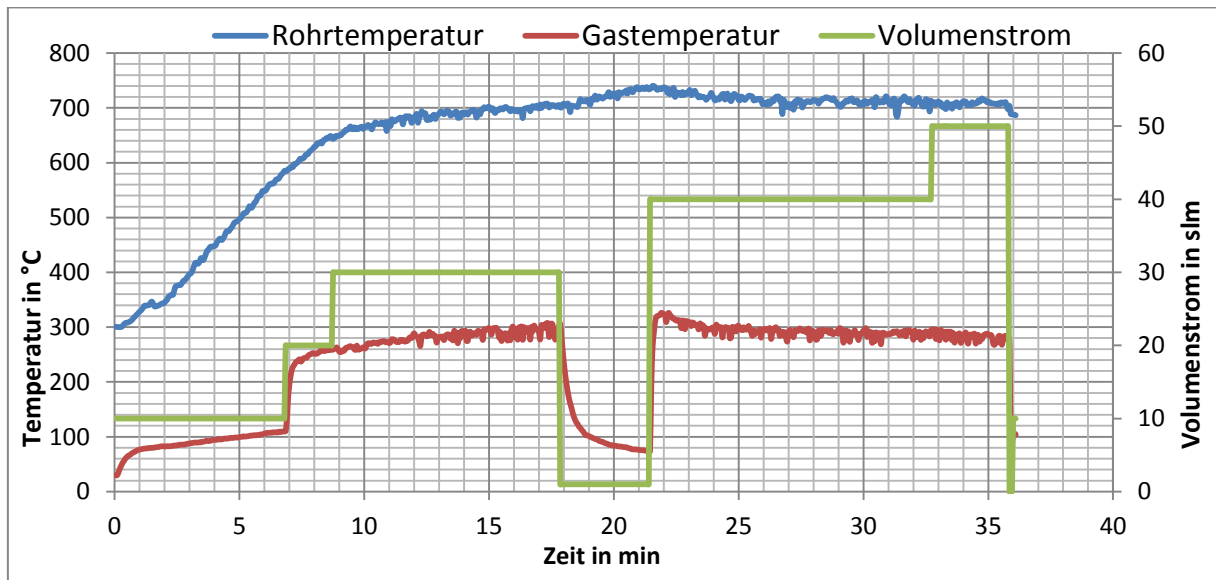


Abbildung 6.3 Temperatur des erhitzten Gases bei 900°C Ofentemperatur

Aus der Abbildung 6.3 ist zu erkennen, dass es zunächst eine bestimmte Zeit (ca. 15 min.) dauert, bis das Rohr, welches durch den Ofen erhitzt wird, einen stationären Zustand erreicht. Dieser stationäre Zustand des Rohres liegt bei ca. 700 °C. Die Temperatur des Gasstromes steigt bis zu einem Volumenstrom von 40 slm auf eine maximale Temperatur von 320 °C an. Ab einem Volumenstrom von 50 slm sinkt die Temperatur des Gasstromes auf 280 °C ab.

Das Verhalten der steigenden Gastemperatur bei Erhöhung des Volumenstroms bis auf 40 slm erscheint zunächst als überraschend, da bei kleinen Volumenströmen \dot{V} und konstanten Rohrdurchmesser d_i die Strömungsgeschwindigkeit v des Mediums sinkt. Dies wird durch Formel (6.1) verdeutlicht.

$$v = \frac{4}{\pi} \times \frac{\dot{V}}{d_i^2} \quad (6.1)$$

Durch die niedrigere Strömungsgeschwindigkeit hat der Gasstrom mehr Zeit sich zu erhitzen und sollte somit deutlich höhere Temperaturen als bei hohen Volumenströmen erreichen. Dies ist jedoch in diesem Versuch nicht der Fall. Um eine genauere Aussage über das Strömungsverhalten des Gasstromes treffen zu können wird die Reynold-Zahl berechnet. Für die Berechnung wird ein Druck von 1 bar angenommen und die kinematischen Viskosi-

tät von Stickstoff für Temperaturbereiche von 100-800 °C. Die Reynold-Zahl lässt sich durch die Formel (6.2) berechnen.

$$Re = \frac{v_i \times d_i}{\nu} \quad (6.2)$$

Re	Reynold-Zahl	
ν	Strömungsgeschwindigkeit	(m/s)
d_i	Innendurchmesser Rohr	(m)
ν_i	kinematische Viskosität	(m ² /s)

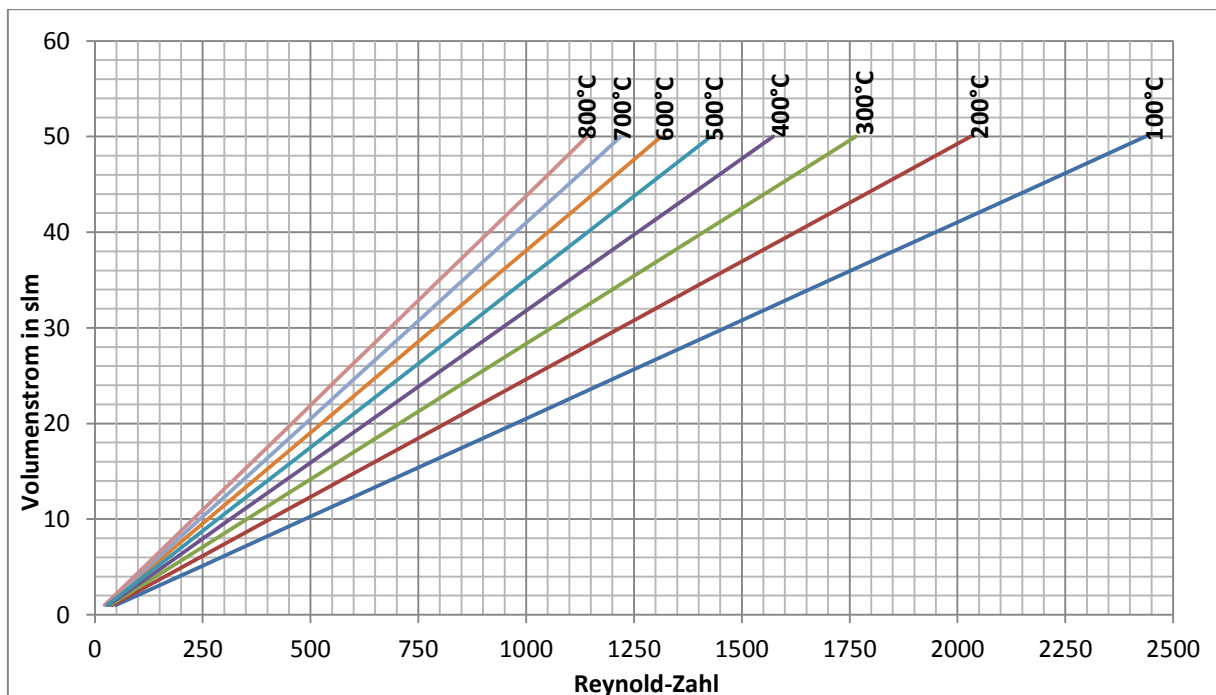


Abbildung 6.4 Berechnung der Reynold-Zahl für verschiedene Volumenströme in Abhängigkeit der Temperatur

Wie sich in Abbildung 6.4 erkennen lässt, liegen die Ergebnisse für die Reynold-Zahl für Volumenströme von 1-50 slm zum größten Teil unter der kritischen Reynold-Zahl von 2300. Diese Zahl kennzeichnet den Übergang von einer laminaren zu einer teilweisen turbulenten Strömung. Daher ist davon auszugehen, dass in diesem Versuch eine laminare Strömung vorliegt. Aufgrund der laminaren Strömung wird nur der Teil des Gasstromes durch Konvektion erwärmt, welcher direkt an der Rohrwand entlang strömt. Das restliche Gas kann nur durch Wärmeleitung innerhalb des Gasstromes erhitzt werden. Da Gase jedoch eine geringe Dichte aufweisen und somit eine schlechte Wärmeleitfähigkeit besitzen, bleibt der Gasstrom in der Mitte deutlich kühler, wodurch der gesamte Gasstrom nicht so stark erhitzt wird.

Aus den Ergebnissen des Versuches und der Rechnung zeigt sich, dass der Gaserhitzer in seinem aktuellen Aufbau nicht für eine ausreichende Erhitzung der Gase geeignet ist. Daher wird der Aufbau des Gaserhitzer geändert. Im Edelstahlrohr werden die Metallbleche durch

eine Schwammstruktur aus Edelstahl ersetzt. Die Schwammstruktur wird sehr enganliegend im Edelstahlrohr platziert. Durch diese Maßnahme wird die erhitzte Fläche, auf die der Gasstrom trifft vergrößert, wodurch der effektive Querschnitt des Rohres sinkt und die Strömungsgeschwindigkeit steigt. Durch eine Erhöhung der Geschwindigkeit und das platzieren einer Schwammstruktur steigt die Wahrscheinlichkeit eine turbulente Strömung zu erzeugen. Die Erzeugung einer turbulenten Strömung hat wiederum zur Folge, dass es zu einer besseren Durchmischung der Gase kommt und somit höhere Temperaturen erreicht werden können. Weiterhin kann aufgrund der Schwammstruktur, welche das gesamte Rohr ausfüllt und der guten wärme Leitfähigkeit von Metall, auch der in der Mitte liegende Teil des Gases effektiver erhitzt werden.

Da die verwendete Schwammstruktur grobporig ist, sollte der Druckverlust durch die Verwendung der Edelstahlstruktur nicht sehr hoch sein und keine negativen Auswirkungen auf das gesamte System haben.

Für den zweiten Vorversuch wird der Gaserhitzer auf eine Temperatur von 900 °C erhitzt und mit Volumenströmen von 5-50 slm durchströmt. Zu Beginn des Versuches beträgt der Volumenstrom 5 slm und wird schrittweise um 5 slm bis auf 50 slm erhöht. Die Erhöhung des Volumenstromes findet immer dann statt, sobald die Gastemperatur am Auslass einen stationären Zustand erreicht hat.

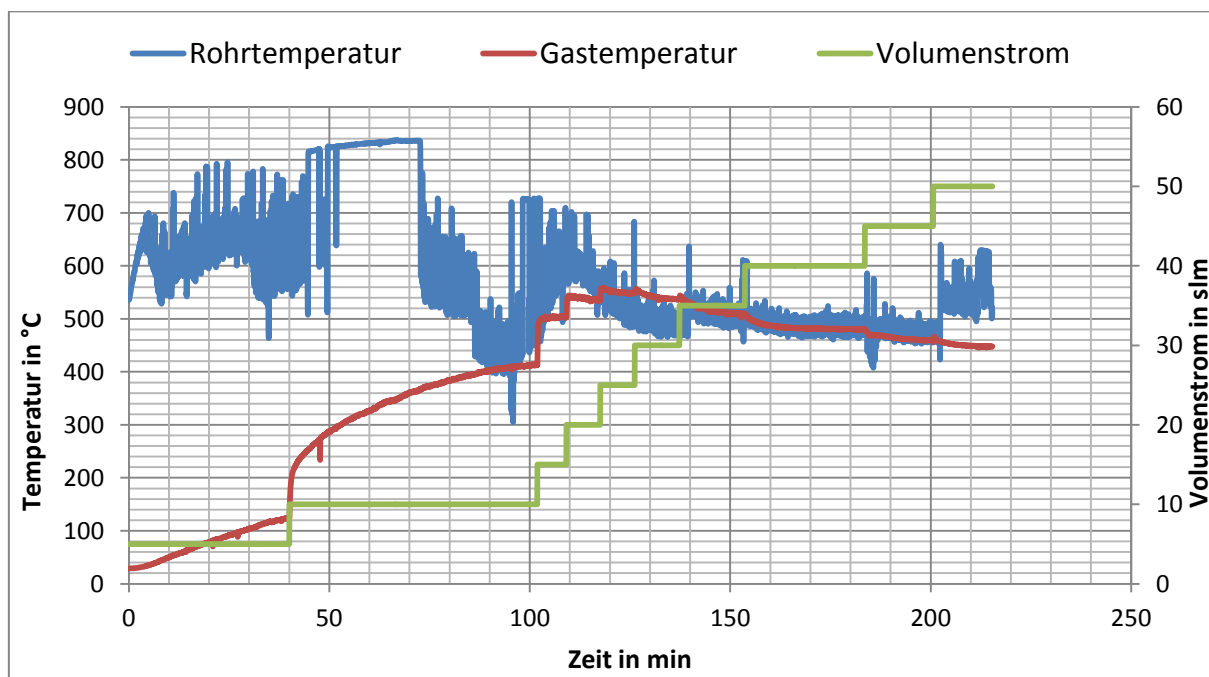


Abbildung 6.5 Temperaturen des Gaserhitzer im 2. Versuch mit einer Schwammstruktur aus Edelstahl

In der Abbildung 6.5 ist dargestellt, dass bei kleinen Volumenströmen (5-10 slm) 70 Minuten vergehen, bis höhere Temperaturen über 350 °C erreicht werden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Gaserhitzer und das Edelstahlrohr mit den Kreuzstücken noch sehr kalt sind und daher viel Wärme des Ofens in die Erhitzung des Rohres und der anderen Komponenten fließt. Darüber hinaus sorgen die noch kalten Rohrelemente dafür, dass sich

das Gas wieder herunter kühlt. Dieser Effekt schwächt sich mit zunehmender Testdauer ab, da sich die Komponenten stetig erwärmen. Dies zeigt sich auch darin, dass die Temperatur ab Volumenströmen von 15 slm deutlich schneller steigt und Temperaturen über 500 °C erreicht. Die maximale Temperatur, wird bei einem Volumenstrom von 25 slm erreicht und beträgt 570 °C. Bei Volumenströmen über 25 slm sinkt die Gastemperatur wieder herab und erreicht bei einem Volumenstrom von 50 slm eine Temperatur von 450 °C. In der Abbildung 6.5 ist weiterhin ersichtlich, dass bei Volumenströmen ab 15 slm stationäre Gastemperaturen schon nach 10 Minuten erreicht werden. Bei Betrachtung der Rohrtemperatur fällt auf, dass diese bei der Erhöhung der Volumenströme zwischen 15-45 slm sinkt obwohl die Temperatur des Ofens nicht verändert wurde. Grund für die Reduzierung der Rohrtemperatur ist dabei, dass mehr Wärme durch eine Erhöhung des Volumenstromes dem Rohr entzogen wird.

Werden im direkten Vergleich die erreichten Temperaturen aus dem ersten und zweiten Versuch (Abbildung 6.6) betrachtet, wird ersichtlich, dass durch die Verwendung der Schwammstruktur aus Edelstahl deutlich größere Temperaturen als bei der Verwendung von Metallblechen erreicht werden. Hier liegt die maximale Temperatur 550 °C, deutlich über der maximalen Temperatur von 300 °C, die mit den Metallblechen erreicht werden. Weiterhin können bei der Verwendung der Schwammstruktur auch bei kleinen Volumenströmen (5-10 slm) deutlich höhere Temperaturen erreicht werden.

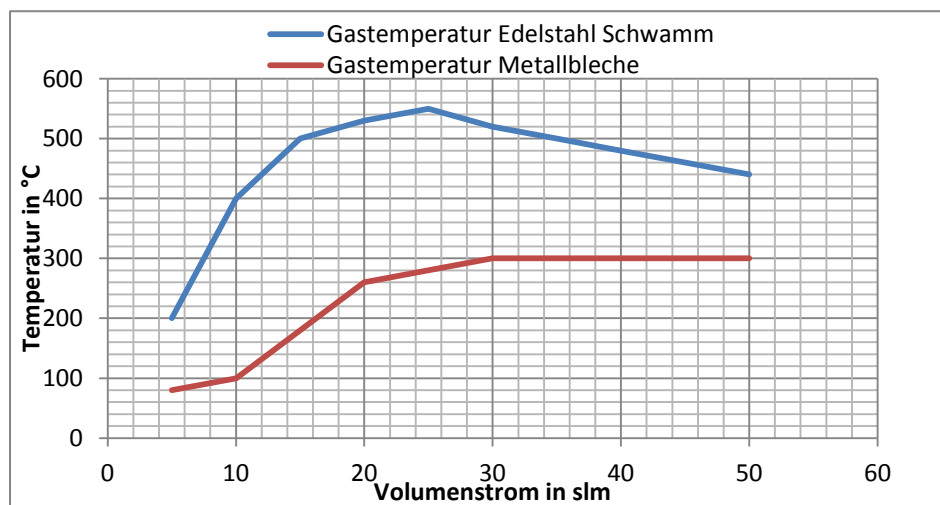


Abbildung 6.6 Direkter Vergleich der Gastemperaturen aus den Versuchen

Bezüglich der erreichten Temperaturen, unter Verwendung der Schwammstruktur, erscheint dieses System für die Erhitzung des Methanstromes als geeignet. Auf Grundlage des zweiten Versuches sollte der Gaserhitzer bei 900 °C vor Versuchsbeginn im Teststand 20-30 Minuten mit einem Volumenstrom von 25 slm durchströmt werden. Durch diese Maßnahme erreicht der Gaserhitzer schneller seinen stationären Zustand und kann dann auch schneller kleine Volumenströme erhitzen.

Um eine genaue Aussage über den Druckverlust im System mit Schwammstruktur zu treffen wird am linken Flanschanschluss (siehe Abbildung 6.7) des Kreuzstückes der Relativdruck gemessen.

Volumenstrom \dot{V} (slm)	Druckverlust Δp (bar)
5	0,0031
10	0,0031
15	0,0063
20	0,0109
25	0,0156
30	0,0219
35	0,0281
40	0,0344
45	0,0438
50	0,0500

Abbildung 6.7 Druckverluste im Gaserhitzer

Die in Abbildung 6.7 aufgelisteten Ergebnisse zeigen, dass die Druckverluste im System mit 0,05 bar bei einem Volumenstrom von 50 slm gering ausfallen und der Druckverlust des Gaserhitzers keine negativen Auswirkungen für das Gesamtsystem des Teststandes bedeuten. Auf Grundlage des geringen Druckverlustes und der erreichten Temperaturen zwischen 400-550 °C bei Volumenströmen von 10-50 slm ist der Gaserhitzer mit einer Füllung aus einer Edelstahlschwammstruktur für die Erhitzung der Edukte im Teststand geeignet und wird in diesen integriert.

7 Inbetriebnahme und Ausarbeitung der ersten Versuchskampagne des Teststandes

In diesem Abschnitt der Arbeit werden die Inbetriebnahme des Teststandes und die dafür durchzuführenden Funktionstests näher beschrieben. Anschließend wird die Erstellung und der Inhalt des Testplans für die erste Versuchskampagne erklärt.

7.1 Inbetriebnahme des Teststandes

Vor der Durchführung erster Versuche im Teststand, müssen zunächst einige Messkomponenten des Teststandes auf ihre korrekte Funktionsweise überprüft werden. Für die Überprüfung sind zunächst alle Gaserhitzer, Volumenstromregler und der Hochleistungsstrahler ausgeschaltet.

Um die korrekte Funktionsweise der Thermoelemente zu prüfen, werden die ausgegebenen Temperaturwerte der Thermoelemente mit der Temperatur eines Referenzthermometers, welches die Raumtemperatur misst, verglichen. Da alle Gaserhitzer und der Hochleistungsstrahler ausgeschaltet sind, müssen die Temperaturen der Thermoelemente etwa den gleichen Wert wie das Referenzthermometer aufweisen. Ist dies nicht der Fall, müssen die Verbindungen überprüft oder ggf. Thermoelemente durch neue ersetzt werden.

Die Überprüfung der Drucksensoren erfolgt unter den gleichen Bedingungen wie die Überprüfung der Thermoelemente (Gaserhitzer, Volumenstromregler und der Hochleistungsstrahler sind ausgeschaltet). Sofern die Drucksensoren richtig verkabelt sind und keine Beschädigungen aufweisen, müssen die Drucksensoren einen Normaldruck von ca. 1,013 bar anzeigen. Zeigen die Drucksensoren einen anderen Wert an, müssen die Verbindungen überprüft oder die Drucksensoren ausgetauscht werden.

Für die Funktionsprüfung des Durchflussmessers, wird dieser mit einem Volumenstromregler verbunden. Anschließend wird der Durchflussmesser mit verschiedenen Luftvolumenströmen durchflossen. Die gemessenen Werte des Durchflussmessers sollten dabei den eingestellten Werten des Volumenstromreglers entsprechen, ansonsten muss die Verkabelung und die Lage des Schwebekörpers im Durchflussmesser überprüft werden.

Die Volumenstromregler und der Gaschromatograph, werden wie in Kapitel 6 beschrieben kalibriert und müssen nicht weiter untersucht werden.

Nachdem die Mess- und Regelungstechnik überprüft und kalibriert ist, wird die Flussdichte der Lampen im Hochleistungsstrahler durch das FATMES bestimmt. Dies ist notwendig um für spätere Versuche Rückschlüsse auf die Strahlungsleistung der Lampen zu ziehen und verschiedene Strahlungsleistungen durch das entsprechende einschalten der Lampen zu erzeugen.

Als weiteren Punkt für die Inbetriebnahme und Funktionsprüfung, wird der Teststand auf Leckagen untersucht. Damit unerwünschte Leckagen in der Verrohrung oder im Receiver-Reaktor gefunden werden können, wird der Teststand mit N_2 bei einem Volumenstrom von 50 l/min durchströmt und mit Hilfe von Leakagespray alle Rohre und Verbindungsstücke auf ihre Dichtigkeit überprüft. Wird durch das Leakagespray eine undichte Stelle gefunden, muss diese mit Teflonband oder mit einer neuen Dichtung beseitigt werden. Neben der

Überprüfung der Dichtigkeit mit Leckagespray sollten auch die gemessenen Werte der Drucksensoren näher betrachtet werden, weisen diese eine sehr große Differenz auf, ist ebenfalls davon auszugehen, dass sich Leckagen im Teststand befinden, die beseitigt werden müssen. In Tabelle 7.1 sind die ersten Schritte für die Inbetriebnahme zusammengefasst.

Schritt	Vorgang
1.	Überprüfung der Messsignale der Thermoelemente, Drucksensoren und Durchflussmesser
2.	Kalibrierung des GC und der Volumenstromregler
3.	Dichtigkeit der Rohrleitungen und Verbindungsstücke prüfen
4.	Bestimmung der Flussdichte der Lampen im HLS

Tabelle 7.1 Erste Schritte zur Inbetriebnahme des Teststandes

Nachdem die ersten Schritte der Inbetriebnahme erfolgt sind, kann nun der Teststand auf sein grundlegendes Verhalten unter Betriebsbedingungen untersucht werden. Von Interesse ist dabei zunächst, die Dichtigkeit der Kanalstruktur des Absorbers sowohl im kalten als auch erhitzten Zustand, sowie die benötigte Zeit zum Erhitzen des Absorbers. Zunächst wird die Dichtigkeit für den kalten Absorber untersucht, wobei die Gaserhitzer und der HLS ausgeschaltet bleiben.

Für diese Versuche, wird im Luftstrom das Gas N_2 und im Methanstrom das Gas CO_2 bei Volumenströmen von 50 l/min verwendet. Für die Untersuchung der Dichtigkeit, wird der eingestellte Volumenstrom am Volumenstromregler des Luftstroms mit dem gemessenen Volumenstrom am Durchflussmesser verglichen. Im Idealfall ist der gemessene Wert identisch mit dem eingestellten Wert am Regler. Sollte der Volumenstrom des Volumenstromreglers zum gemessenen Wert des Durchflussmessers eine Differenz aufweisen, ist davon auszugehen, dass in der Kanalstruktur keine Dichtigkeit vorhanden ist. Des Weiteren wird im diesem Versuch der Methanstrom und der Luftstrom mit dem Gaschromatographen untersucht. Befinden sich nach der Analyse durch den Gaschromatographen im Methanstrom große Mengen von N_2 bzw. im Luftstrom CO_2 , ist dies ebenfalls ein Indiz dafür, dass die Kanalstruktur innerhalb des Absorbers durchlässig ist. Einen weiteren Anhaltspunkt über die Dichtigkeit der Kanalstruktur, können die Drucksensoren liefern. Stellt man bei einen von ihnen einen großen Druckabfall fest kann daraus ebenfalls geschlossen werden, dass die Kanalstruktur nicht die gewünschte Dichtigkeit aufweist.

Für die Betrachtung der Dichtigkeit des Absorbers im erhitzten Zustand, wird der Absorber mit dem Gaserhitzer oder dem HLS erhitzt, wobei die gleichen Messungen, Volumenströme und Gase, wie bei dem Versuch mit dem kalten Absorber verwendet werden.

Für das Aufheizen des Absorbers mit den Gaserhitzern, werden die maximal erreichbaren Temperaturen der Gaserhitzer verwendet. Für die Erhitzung des Methanstroms beträgt die maximale Temperatur 500 °C und für die Temperatur des Luftstroms 815 °C.

Dabei ist vor allem von Interesse in welcher Zeit eine Temperatur von 650 °C im Absorber, durch die Nutzung der Gaserhitzer, erreicht werden kann.

Wird der Hochleistungsstrahler zum Erhitzen des Absorbers verwendet, wird der Absorber auf die Temperaturen 650°C, 750 °C und 850 °C erhitzt. Dabei gilt es wieder die benötigte Zeit für die Erreichung der Temperatur sowie die benötigte Strahlung seitens des HLS zu

bestimmen. Nach der Inbetriebnahme und dem Testen der Dichtigkeit des Absorbers, kann der ausgearbeitete Testplan der ersten Testkampagne durchgeführt werden.

7.2 Erstellung des Testplans für die erste Testkampagne

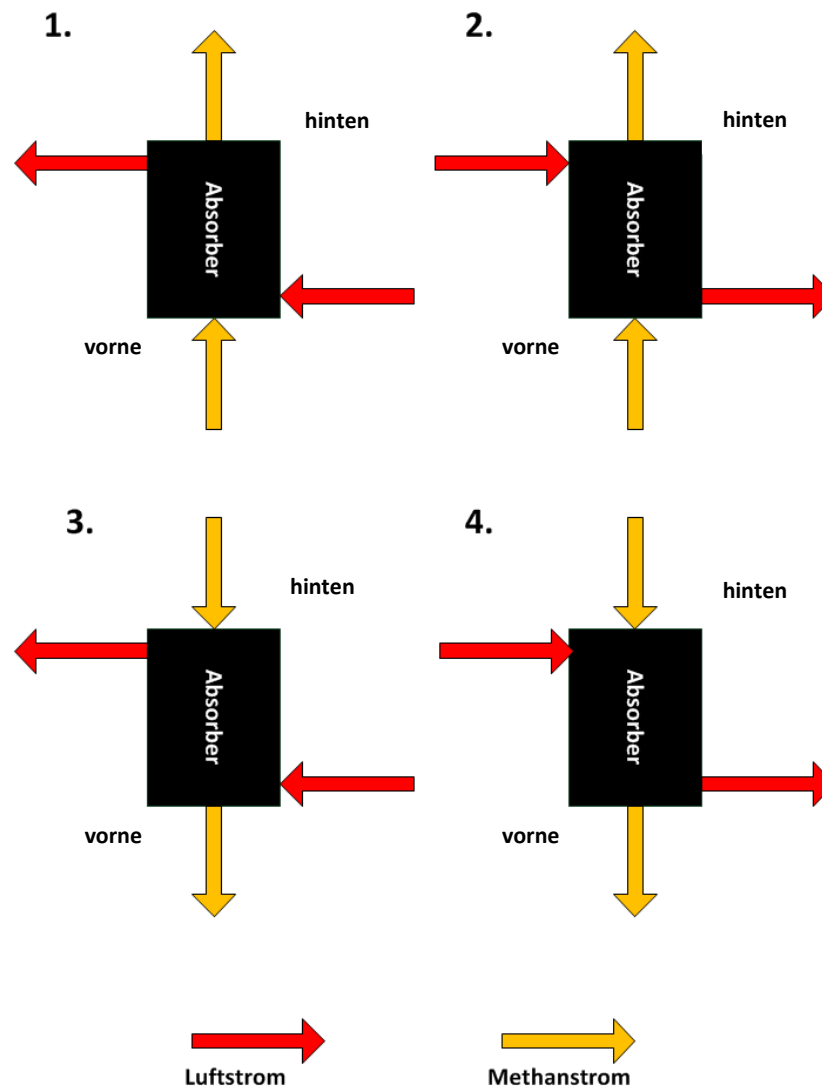
In der ersten Testkampagne soll zunächst nur der thermische Wirkungsgrad n_{th} des Absorbers ausgiebig getestet werden. Die Erstellung eines dafür geeigneten Testplans erfolgt mit Software Cornerstore und der Methode der statistischen Versuchsplanung, auch unter dem Namen „Design of Experiment“ (DoE) bekannt. In konventionellen Versuchsreihen wird häufig immer nur eine Einstellgröße pro Versuchsteil nacheinander geändert und die daraus folgende Auswirkung untersucht (One Factor At A Time Methode). Bei Experimenten mit wenigen Einstellgrößen (ein oder zwei) führt diese Methodik noch relativ schnell zu brauchbaren Ergebnissen. Weitaus Zeitaufwändiger wird es jedoch, wenn die Anzahl der Einstellgrößen steigt. Um den Zeitaufwand trotz vieler Einstellgrößen möglichst gering zu halten, bietet sich die Methodik der statistischen Versuchsplanung an. Durch die Verwendung dieser Methodik, wird der Versuchsaufwand reduziert, da nicht nur eine Einstellgröße im Teststand geändert wird, sondern zeitgleich immer mehrere Einstellgrößen pro Versuchsteil verändert werden. Außerdem können durch die Methodik schneller Wechselwirkungen zwischen den Einstellgrößen und der Einfluss einzelner Einstellgrößen auf das Gesamtsystem analysiert werden.

Für die Ermittlung des thermischen Wirkungsgrades n_{th} des Absorbers im Teststand, sind sieben Einstellgrößen mit entsprechenden Randbedingungen gegeben. Die ersten fünf Einstellgrößen und ihre Randbedingungen sind in Tabelle 7.2 aufgelistet.

Einstellgröße	Randbedingung
T_1 Temperatur des Luftstroms	20-500 °C
T_2 Temperatur des Methanstroms	20-850 °C
$T_{Abs.}$ Temperatur des Absorbers	650-900 °C
V_1 Volumenstrom des Luftstroms	10-300 l/min
V_2 Volumenstrom des Methanstroms	5-130 l/min

Tabelle 7.2 Einstellgrößen im Teststand mit den dazugehörigen Randbedingungen

Neben den Volumenströmen und den Temperaturen kann auch die Durchströmungsrichtung des Luftstroms und des Methanstrom durch den Absorber geändert werden. Dafür müssen lediglich die Anschlüsse am Receiver-Reaktor getauscht werden. In Abbildung 7.1 sind die möglichen Durchströmungsrichtungen des Luft- und Methanstroms abgebildet.



7.1 Durchströmungsrichtung des Luft- und Methanstroms

Aus der Abbildung 7.1 ergeben sich die zwei fehlenden Einstellgrößen mit ihren Randbedingungen, welche in Tabelle 7.3 aufgelistet werden.

Einstellgröße	Randbedingung
sr_1 Strömungsrichtung Methanstroms	vorne-hinten; hinten-vorne
sr_2 Strömungsrichtung Luftstroms	rechts-links, links-rechts

Tabelle 7.3 Einstellgrößen mit Randbedingung des Methan- und Luftstroms

Nachdem alle Einstellgrößen und ihre Randbedingungen festgelegt und in die Software Cornerstone übertragen sind, erstellt diese ein sogenanntes Modell, das im Grunde genommen eine Polynomfunktion zur Berechnung des Wirkungsgrades ist. Die Polynomfunktion besteht aus einer Konstante, den sieben Einstellgrößen und den Wechselwirkungen zwischen den Einstellgrößen. Vor Erstellung des Versuchsplans muss in einer Systemanalyse betrachtet werden, welche Terme für das Polynom in Frage kommen. Ob diese Terme später wirklich einen Einfluss auf den Wirkungsgrad haben, wird die Auswertung des Experiments zeigen.

Für die erste Testkampagne wird berücksichtigt, dass die Temperaturen, Volumenströme und die Strömungsrichtung der Gase, einen quadratischen Einfluss auf den Wirkungsgrad haben könnten. Das führt dazu, dass pro Einflussgröße drei Stützstellen im Testplan berücksichtigt werden.

Die Temperatur des Absorbers $T_{Abs.}$ wird jedoch mit einer Einflussgröße der Potenz vier angenommen. Dies erklärt sich dadurch, dass die Temperatur für die Berechnung des abgestrahlten Wärmestroms eines Körpers ebenfalls mit der vierten Potenz in die Berechnung eingeht, siehe Formel (7.1). Daher sind im Fall der Absorbertemperatur fünf Stützstellen im Testplan vorhanden. Eine Übersicht der verschiedenen Stützstellen befindet sich im Anhang B. der Arbeit.

$$\dot{Q} = \varepsilon \times \sigma \times A \times T^4 \quad (7.1)$$

ε	Emissionsgrad	(-)
σ	Stefan-Boltzmann-Konstante	W/m ² K ²
A	Oberfläche des abstrahlenden Körpers	m ²
T	Temperatur des abstrahlenden Körpers	K

Aus dem Zusammenhang der Anzahl der Einstellgrößen, ihrer Wechselwirkung und der Gewichtung, erstellt das Programm eine Polynomfunktion mit 35 Variablen ($T_1, T_2 \dots$) und 35 unbekannten Koeffizienten ($x_1; x_2 \dots$). Ein Teil der Funktion ist in Formel (7.2) dargestellt.

$$P(T_1; T_2 \dots) = T_1 x_1 + T_2 x_2 + T_1 T_2 x_3 + \dots \quad (7.2)$$

Damit das Polynom gelöst werden kann, erstellt die Software unter Zuhilfenahme statistischer Methoden einen Testplan mit 40 Teilversuchen. Die Teilversuche werden im Teststand durchgeführt bzw. die entsprechenden Punkte für Temperatur, Volumenstrom und Strömungsrichtung angefahren. In Tabelle 7.4 sind die Einstellgrößen für die ersten Teilversuche dargestellt. Eine Übersicht aller Teilversuche befindet sich im Anhang B. der Arbeit.

Versuch	T_1 °C	T_2 °C	V_1 l/min	V_2 l/min	$T_{Abs.}$ °C	Sr_1	Sr_2
1.	20	20	10	5	650	vorne nach hinten	rechts nach links
2.	440	20	300	5	650	vorne nach hinten	rechts nach links
3.	850	500	10	68	650	vorne nach hinten	rechts nach links
4.	20	500	300	130	650	vorne nach hinten	rechts nach links
5.	850	500	300	5	710	vorne nach hinten	rechts nach links

Tabelle 7.4 Einstellgrößen für die ersten Teilversuche

Für die weitere Auswertung und Analyse des thermischen Wirkungsgrades im Absorber, wird der erreichte Wirkungsgrad entsprechend Kapitel 4.7 berechnet und das Ergebnis in die Software Cornerstore übertragen. Dieses ist nun in der Lage über die berechneten Wir-

kungsgrade die unbekannten Koeffizienten ($x_1; x_2 \dots$) der erstellten Polynomfunktion zu lösen. Dadurch entsteht eine Polynomfunktion mit bekannten Koeffizienten, mit der man in der Lage ist, den Wirkungsgrad mit verschiedenen Einstellgrößen (Variablen) unter Betrachtung der Wechselwirkung zu berechnen, ohne dafür weitere reale Versuche durchzuführen. Des Weiteren kann durch nähere Analyse der Polynomfunktion herausgefunden werden, welche Einstellgrößen und Wechselwirkungen einen besonders hohen oder geringen Einfluss auf den Wirkungsgrad haben.

Durch die Analyse können weitere Testpläne für nachfolgenden Testkampagnen erstellt werden, die sehr zielgerichtet auf die wichtigen Einstellgrößen und Wechselwirkungen ausgerichtet sind. Dadurch wird der Zeitaufwand reduziert und die Aussagekraft der Ergebnisse deutlich erhöht.

8 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde der Aufbau und Betrieb eines Teststandes zur solaren Methanreformierung erarbeitet. Zentrales Bauteil des Teststandes ist dabei ein Absorber mit einer neuen Zweikanalstruktur, welcher der konzentrierten Strahlung in einem Hochleistungsstrahler ausgesetzt ist und als Wärmetauscher fungiert. In der Hälfte der Kanäle des Absorbers kann durch die Beschichtung mit einem Katalysator eine thermochemische Reaktion zwischen CH_4 , CO_2 und H_2O zu Synthesegas stattfinden. In den anderen Kanälen findet ein Wärmeaustausch mit dem Wärmeträgermedium Luft statt. So kann bei der Simulation eines Tagbetriebes im Strahler die Synthesegasherstellung erfolgen und zeitgleich Luft auf hohe Temperaturen erhitzt werden. Wird ein Nachtbetrieb im Strahler simuliert, kann Luft durch einen im Teststand eingebauten Gaserhitzer aufgeheizt werden um den thermochemischen Prozess der Reformierung auch ohne Strahlung fortzuführen. Um die Edukte und Produkte im Teststand zu transportieren, wurde auf Grundlage einer Druckverlustberechnung die Verrohrung für den Teststand ausgewählt und ein bestehender Receiver-Reaktor überarbeitet. Für die Verrohrung bis zum Receiver-Reaktor wurden Rohre mit 40 mm Innendurchmesser verwendet. Die Verrohrung des Reaktors selbst erfolgt für den Methanstrom mit 10 mm und für den Luftstrom mit 16 mm Innendurchmessern. Für die Messung und Regelung der Temperaturen, Drücke, Volumenströme und Gaszusammensetzungen wurden verschiedene Mess- und Regelungskomponenten ausgewählt und eine Schnittstelle zu einem erstellten LabVIEW Programm hergestellt.

Aufgrund der Temperaturen im Teststand von 20-1000 °C werden Thermoelemente des Typs K für die Messung der Temperaturen im Teststand verwendet. Die Messung der Drücke erfolgt über piezoresistive Drucksensoren die für einen Messbereich von 0-2,5 bar Relativdruck ausgelegt sind. Über Volumenstromregler werden die Volumenströme der Edukte eingestellt. Außerdem wird der Volumenstrom der Luft am Ausgang des Receiver-Reaktors mit einem Schwebekörperdurchflussmesser bestimmt. Durch diese Messung ist es möglich, Rückschlüsse auf die Dichtigkeit des Absorbers zu ziehen.

Damit das reformierte Synthesegas analysiert werden kann, wird ein Gaschromatograph verwendet, welcher aufgrund seines Aufbaus für die gleichzeitige Analyse von CO_2 und CO geeignet ist.

Mit dem Programm LabVIEW können die Messdaten wie z.B. Temperatur und Druck grafisch dargestellt und die Volumenströme der unterschiedlichen Edukte eingestellt werden. Um die Sicherheit während den Versuchen im Teststand zu erhöhen, wurden im LabVIEW Programm Warnanzeigen implementiert. Sollte der Druck 1,5 bar oder die Temperatur den Wert 950 °C überschreiten wird dem Anwender ein Warnsignal angezeigt. Das Programm ist weitergehend in der Lage, eine vorläufige Bestimmung der Prozessgüte in Form von der Berechnung des Wirkungsgrades und der Durchschnittstemperaturen im Absorber durchzuführen. Damit die erfassten und weiter verarbeiteten Daten näher analysiert werden können, speichert das erstellte LabVIEW Programm die Daten in einem Textfile.

Im Anschluss der Auswahl der Mess- und Regelungstechnik und der Realisierung eines LabVIEW Programms, erfolgte eine Betrachtung der Messunsicherheiten der im Teststand eingesetzten Messtechnik. Für die Betrachtung der Unsicherheit wurde der GUM verwendet

und eine maximale Messunsicherheit der Temperaturmessung von $\pm 12,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ bei $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ermittelt. Die Messunsicherheit der Druckmessung beträgt bei $2,5\text{ bar} \pm 0,04\text{ bar}$ und für die Durchflussmessung bei $50\text{ l/min} \pm 1,43\text{ l/min}$. Auf Grundlage der Betrachtung der Messunsicherheit wurde eine Fehlerfortpflanzung für den Wirkungsgrad durchgeführt. Zum Betrieb des Teststandes wurden die Volumenstromregler kalibriert und Kalibrierungsgeraden erstellt. Ebenso wurde der Gaschromatograph für die Analyse des produzierten Synthesegases kalibriert und die Kalibrierungsgeraden für die zu analysierenden Gase erstellt. Um eine Wärmerückgewinnung aus dem heißen Synthesegas zu simulieren, wurde ein Gaserhitzer entwickelt, der vor der Inbetriebnahme des Teststandes ausgiebig getestet wurde. Der Gaserhitzer ist in der Lage, die Gase auf $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ vorzuheizen und besitzt bei einem Volumenstrom von 50 slm einen Druckverlust von $0,05\text{ bar}$. Im letzten Teil dieser Arbeit wurde die Inbetriebnahme ausgearbeitet und ein Testplan mit 40 Teilversuchen für die erste Testkampagne erstellt.

9 Ausblick

Durch den in dieser Thesis erarbeiteten Teststand ist nun die Möglichkeit gegeben, den Prozess der Synthesegasherstellung zu einem kontinuierlichen solarthermischen Reformierungsprozess weiterzuentwickeln und grundlegend zu analysieren. Mit Hilfe des Teststandes können die Einflüsse verschiedener Parameter wie Temperatur, Volumenströme, Druck und Gaszusammensetzung auf den solarthermischen Reformierungsprozess genauer untersucht und die Ergebnisse von Modellen validiert werden. Außerdem können die maximalen und durchschnittlich erreichbaren Wirkungsgrade des Receiver-Reaktors bzw. des Absorbers im Tag- und Nachtbetrieb bestimmt werden.

Neben dem breiten Spektrum an Versuchen, die durch den Teststand ermöglicht werden, sollte auch der Teststand selbst genauer analysiert und optimiert werden. So ist beispielsweise nicht genau klar, wie lange der Receiver-Reaktor benötigt um einen stationären Zustand zu erreichen und wie sich die verschiedenen Materialien (Keramik, SiC und Stahl) die im Receiver-Reaktor zum Einsatz kommen, bezüglich ihrer Wärmeausdehnung untereinander verhalten. Des Weiteren ist von Interesse, wie hoch die Dichtigkeit des Übergangs zwischen den entwickelten Absorberanschlüssen und dem Absorber ist und in wie weit die Anschlüsse optimiert werden können. Auch die Erhitzung der Luft für die Simulation eines Nachtbetriebes sollte dahin gehend verbessert werden, dass höhere Temperaturen als 815 °C erreicht werden können.

Das erstellte LabVIEW Programm bietet ebenfalls die Möglichkeit, weiter optimiert zu werden. So könnte zum Beispiel versucht werden die Volumenstromregler direkt über das LabVIEW Programm anzusteuern ohne ein Steuergerät für die Regler zu verwenden. Weiterhin könnten die Gaserhitzer ebenfalls direkt per LabVIEW angesteuert werden, um den Verdrahtungsaufwand zu reduzieren und die Steuerung des Teststandes zu zentralisieren. Insgesamt betrachtet bietet der Teststand in seinem derzeitigen Aufbau eine solide Grundlage für die Erforschung und Entwicklung eines kontinuierlichen solarthermischen Methanreformierungsprozess zu Synthesegas. Darüber hinaus kann die Technologie für andere Reaktionen wie z. B. solarthermische Schwefelsäurespaltung verwendet werden. Durch ein geändertes Temperaturprofil im Absorber können möglicherweise längere Verweilzeiten erreicht werden und somit auch langsamere Reaktionen direkt solar betrieben werden.

Literaturverzeichnis

- [1] H. Andruleit, A. Bahr, H. G. Barbies, D. Franke, J. Meßner, R. Pierrau, M. Schauer, S. Schmidt und S. Weihmann, *Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen*, Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), 2013.
- [2] B. f. Energie. [Online]. Available: <http://www.bfe.admin.ch/themen/00486/>. [Zugriff am 21 Oktober 2014].
- [3] V. Quasching, *Regenerative Energiesysteme Technologien-Berechnungen-Simulation*, Auflage 4., München: Carl Hanser, 2006, pp. 30-36.
- [4] S. K. Ngoh, D. Njomob, *An overview of hydrogen gas production from solar energy*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 2005, volume 16, pp. 6782–6792.
- [5] A. Steinfeld, *Solar thermochemical production of hydrogen- a review*, Solar Energy, 2005, volume 78, pp. 603-615.
- [6] C. Agrafiotis, H.v. Storch, M. Roeb, C. Sattler, *Solar thermal reforming of methane feedstocks for hydrogen and syngas production*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, volume 29, pp. 656–682.
- [7] A. Vita, L. Pino, L. Massimo, V. Recupero, M. Laganà, *Biogas as renewable rawmaterial for syngas production by tri-reforming process over NiCeO₂ catalysts: Optimal operative condition and effect of nickel content*, Fuel Processing Technology, volume 127, 2014, pp. 47-58.
- [8] O. Bereketidoua, M. Goulaa, *Biogas reforming for syngas production over nickel supported on ceria–alumina catalysts*, Catalysis Today, 2012, volume 195, pp. 93-100.
- [9] S. Wolf-Dieter, *Thermal energy storage systems for concentrating solar power (CSP) technology*, Advances in Thermal Energy Storage Systems Hrsg., Woodhead Publishing, 2014.
- [10] DLR. [Online]. Available: http://www.dlr.de/media/desktopdefault.aspx/tabid-4987/8424_page-1/. [Zugriff am 20 November 2014].
- [11] R. Pitz-Paal, J. Dersch und B. Milow, *European Concentrated Solar Thermal Road Mapping*, DLR intern, 2005.
- [12] DLR, [Online], Available: http://www.bine.info/fileadmin/content/Publikationen/Themen-Infos/II_2013/themen_0213_03.jpg. [Zugriff am 4 März 2015].
- [13] G. Koll, P. Schwarzbözl, K. Hennecke, H. Thomas, S. Mark und B. Hoffschmidt, *THE SOLAR TOWER JÜLICH – A RESEARCH AND DEMONSTRATION PLANT FOR CENTRAL RECEIVER SYSTEMS*, SolarPACES Proceeding Berlin, 2009.

- [14] DLR/SF. [Online]. Available: http://www.dlr.de/sf/desktopdefault.aspx/tabid-7159/11923_read-28158/. [Zugriff am 17 Dezember 2014].
- [15] J. Muir, R. Hogan, R. Skocypec, R. Buck, *Solar reforming of methane in a direct absorption catalytic reactor on an parabolic dish*, Solar Energy, 1994, volume 52, pp. 467-477.
- [16] A. Wörner, R. Tamme, *CO₂ reforming of methane in a solar driven volumetric receiver-reactor*, Catalist Today, 1998, volume 46, pp. 165-174.
- [17] M. Abele, H. Bauer, R. Buck, R. Tamme und R. Wörner, *Design an tests result of a receiver-reactor for solar methane reforming*, Solar Energy, 1996, Solar Engineering; ASME Solar Energy Conf., 31 March-3 April 1996, pp. 339-34
- [18] V. Anikeev, A. Bobrin, J. Ortner, S. Schmidt, K.-H. Funken, N. Kuzin, *Catalytic thermochemical reactor/receiver for solar reforming of natural gas: design an performance*, Solar Energy, 1998, volume 133 pp. 97-104.
- [19] T. Fend, R. Pitz-Paal, B. Hoffschmidt, O. Reutter, M. Scheffler, P. Colombo, *Solar radiation conversion in Cellular Ceramics: Structure, Manufacturing, Properties and Application*, Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.,KgaA, 2005.
- [20] G. Dibowskie, *HLS Betriebshandbuch, DLR intern*, 2011.
- [21] C. Song, K. Liu, V. Subramani *Hydrogen and Syngas Production and Purification Technologies*, John Wiley & Sons, New Jersy, 2010.
- [22] J. Bitter, K. Seshan, J. Lercher, *Mono and Bifunctional Pathways of CO₂/CH₄ Reforming over Pt and Rh Based Catalysts*, Journal of Catalysis, 1997, volume 176, pp. 93-101.
- [23] J.R. Rostrupnielsen, J.H.B. Hansen, *CO₂-Reforming of Methane over Transition Metals*, Journal of Catalysis, 1993, volume144, pp. 38-49
- [24] S. Özkara Aydinoglu, A. Aksoylu, *CO₂ reforming of methane over PteNi/Al₂O₃ catalysts: Effects of catalyst composition, and water and oxygen addition to the feed*, International Journal of Hydrogen Energy, 2010, volume 36, pp. 2950-2959.
- [25] S. D. Angeli, G. Monteleone, A. Giaconia, A. A. Lemonidou, *State-of-the-art catalysts for CH₄ steam reforming at low temperature*, International Journal of Hydrogenenergy, 2013, volume 39, pp. 1979-1997.
- [26] ADROP Feuchtemeßtechnik GmbH, *ASteam Direktverdampfer und Temperierung, Datenblatt*, 01.02.2011.
- [27] MKS Instruments Deutschland GmbH, *Multi Channel Flow Ratio/Pressure Controller Type 647C, Datenblatt*, 01.06.2012.
- [28] H. Wittel, D. Muhs, D. Jannasch, V. Joachim, *Rolof/ Matek Maschinenelemente*, Auflage 20., Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2010.

- [29] V.-G. V. u. Chemieingenieurwesen, *VDI-Wärmeatlas*, Auflage 10., Heidelberg: Springer-Verlag, 2006.
- [30] C. Agrafiotisa, M. Roeb, V.T. Zaspalis, C. Sattler, P.Stobbe, A.M.Steele, L.Nalbandian, *Solar water splitting for hydrogen production with monolithic reactors*, Solar Energy, 2005, volume 79, pp. 409–421.
- [31] Unifrax GmbH, *Insulfrax® S Matte, Datenblatt*, 02.07.2012.
- [32] TC Mess-und Regelungstechnik GmbH, *Handbuch zur Temperaturmessung mit Thermoelementen und Widerstandsthermometern*, Datenblatt, Version 6.1, pp. 8-9.
- [33] AWS-Technik, *Wasserkondensator DLR Institut für Technische Thermodynamik*, Technischezeichnung, 04.12.2012.
- [34] Elster GmbH, *EnCal 3000 Gaschromatograph Hardware Handbuch*, Handbuch, 18.09.2013, p. 7.
- [35] OsramSylvania,[Online],
Available:https://assets.sylvania.com/assets/documents/Datasheet_Serpentine_6392f99-4f01-4d47-9df5-48a1dce2c6d4.pdf. [Zugriff am 22 Februar 2015].
- [36] JUMO GmbH & Co.Kg, *JUMO MIDAS C08 Typenblatt 4010002*, Datenblatt, 23.10.2014.
- [37] Advantech Co., *Adam-5000-TCP*, Datenblatt, 19.03.2014.
- [38] Advantech Co., *Adam-5018*, Datenblatt, 28.08.2013.
- [39] Arbeitsgruppe 1 des Gemeinsamen Ausschusses für Leitfäden in der Metrologie, *Auswertung von Messdaten – Eine Einführung zum "Leit-faden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen" und zu den dazugehörigen Dokumenten*, JCGM-Mitgliedsorganisationen, 30.03.2011.
- [40] Carl-EnglerSchuleKarlsruhe,[Online].
Available:http://www.ces.karlsruhe.de/culm/culm/culm2/th_messdaten/mdv5_messunsicherheit.pdf. [Zugriff am 04 02 2015].
- [41] Advantech Co., *Adam-5017*, Datenblatt, 28.08.2013.
- [42] Rota Yokogawa GmbH & Co. KG, *Modell RAMC metallischer ROTAMETER*, 11.10.2013, Bedienungsanleitung, pp. 9-5.
- [43] MKS Instruments, Inc., *Type 1179A GENERAL PURPOSE MASS-FLO® CONTROLLER*, Datenblatt, 12.08.2006.
- [44] RÖMPP, [Online]. Available: <https://roempp.thieme.de/roempp4.0/do/data/RD-11-00605>. [Zugriff am 03 Dezember 2014].

Anhang

Anhang A. Berechnung des Wirkungsgrades und Betrachtung des Fehlers

Die Berechnung des thermischen Wirkungsgrades n_{th} erfolgt nach Formel (A.1) und der Wärmestrom \dot{Q}_{Nutzen} berechnet sich durch Formel (A.2). Für die Berechnungen werden die Werte aus Tabelle A.2 verwendet. Die Werte wie Temperatur und Massenstrom sind frei gewählt und beruhen nicht auf Werten aus durchgeführten Versuchen im Teststand.

$$n_{th} = \frac{\dot{Q}_{Nutzen}}{\dot{Q}_{Strahlung}} \quad (A.1)$$

$$\dot{Q}_{Nutzen} = (\dot{m}_1 c_{p1} + \dot{m}_2 c_{p2} + \dot{m}_3 c_{p3}) \times (T_2 - T_1) + (\dot{m}_4 c_{p4}) \times (T_4 - T_3) \quad (A.2)$$

\dot{m}_1	Massenstrom CH ₄	1,07
\dot{m}_2	Massenstrom CO ₂	0,88
\dot{m}_3	Massenstrom H ₂ O	0,00
\dot{m}_4	Massenstrom Luft	2,89
c_{p1}	Spezifische Wärmekapazität CH ₄	3,60
c_{p2}	Spezifische Wärmekapazität CO ₂	1,20
c_{p3}	Spezifische Wärmekapazität H ₂ O	2,08
c_{p4}	Spezifische Wärmekapazität Luft	1,08
T_1	Temperatur Methanstrom Receiver-Reaktoreingang	300
T_2	Temperatur Methanstrom Receiver-Reaktorausgang	1100
T_3	Temperatur Luftstrom Receiver-Reaktoreingang	300
T_4	Temperatur Luftstrom Receiver-Reaktorausgang	1100
$\dot{Q}_{Strahlung}$	Wärmestrom vom Strahler ausgehend	10000

Tabelle A.1 Beispielwerte für die Berechnung des Wirkungsgrades

Werden die in Tabelle A.1 angegebenen Werte für die Berechnung von \dot{Q}_{Nutzen} verwendet, ergibt dies den Wert $\dot{Q}_{Nutzen} = 6461,65 \text{ W}$. Unter Verwendung von $\dot{Q}_{Strahlung} = 10000 \text{ W}$, wird ein thermischer Wirkungsgrad n_{th} von 64,62 %, siehe Formel (A.3), errechnet.

$$n_{th} = \frac{6461,65 \text{ W}}{10000 \text{ W}} = 64,62\% \quad (A.3)$$

Der Fehler des Wirkungsgrades kann durch die Formel (A.4) berechnet werden.

$$\Delta n_{th} = \sqrt{\left(\frac{1}{Q_{Strahlung}} \times \Delta Q_{Nutzen}\right)^2 + \left(\frac{Q_{Nutzen}}{Q_{Strahlung}^2} \times \Delta Q_{Strahlung}\right)^2} \quad (A.4)$$

Für die Berechnung werden die Werte für $\dot{Q}_{Strahlung} = 10000 \text{ W}$ und $\dot{Q}_{Nutzen} = 6461,65 \text{ W}$ angenommen. Bei einem relativen Fehler von 3,5 % für $\dot{Q}_{Strahlung}$ ergibt sich der Wert $\Delta Q_{Strahlung} = 350 \text{ W}$. Der Fehler für ΔQ_{Nutzen} kann mit der Formel (A.5) berechnet werden.

$$\Delta Q_{Nutzen} = \sqrt{\begin{aligned} &((\dot{m}_1 c_{p1} + \dot{m}_2 c_{p2} + \dot{m}_3 c_{p3}) \times \Delta T_1)^2 + \\ &((\dot{m}_1 c_{p1} + \dot{m}_2 c_{p2} + \dot{m}_3 c_{p3}) \times \Delta T_2)^2 + \\ &((T_2 - T_1) \times c_{p1} \times \Delta \dot{m}_1)^2 + \\ &((T_2 - T_1) \times c_{p2} \times \Delta \dot{m}_2)^2 + \\ &((T_2 - T_1) \times c_{p3} \times \Delta \dot{m}_3)^2 + \\ &((T_4 - T_3) \times c_{p4} \times \Delta \dot{m}_4)^2 + \\ &((\dot{m}_4 c_{p4}) \times \Delta T_3)^2 + \\ &((\dot{m}_4 c_{p4}) \times \Delta T_4)^2 \end{aligned}} \quad (A.5)$$

Für die Berechnung von ΔQ_{Nutzen} werden die Werte aus Tabelle A.1 und Tabelle A.2 genutzt. Durch einsetzen der Werte in Formel (A.5) ergibt dies $\Delta Q_{Nutzen} = 116,4 \text{ W}$. Die Messungenauigkeiten für ΔT und $\Delta \dot{m}$ werden durch die Berechnungen in Kapitel 5 bestimmt.

ΔT_1	Messungenauigkeit Methanstrom Receiver-Reaktoreingang	6,12
ΔT_2	Messungenauigkeit Methanstrom Receiver-Reaktorausgang	12,70
ΔT_3	Messungenauigkeit Luftstrom Receiver-Reaktoreingang	6,12
ΔT_4	Messungenauigkeit Luftstrom Receiver-Reaktorausgang	12,70
$\Delta \dot{m}_1$	Messungenauigkeit Massenstrom CH ₄	0,02
$\Delta \dot{m}_2$	Messungenauigkeit Massenstrom CO ₂	0,02
$\Delta \dot{m}_3$	Messungenauigkeit Massenstrom H ₂ O	0,00
$\Delta \dot{m}_4$	Messungenauigkeit Massenstrom Luft	0,06

Tabelle A.2 Messungenauigkeiten der Temperatur und des Massenstroms

Durch einsetzen der entsprechenden Werte in Formel (A.4) ergibt sich ein Fehler für den thermischen Wirkungsgrad Δn_{th} von $\pm 3,43\%$.

Anhang B. Teilversuche der ersten Testkampagne

Versuch	T_1 °C	T_2 °C	V_1 l/min	V_2 l/min	$T_{Abs.}$ °C	Sr_1	Sr_2
1.	20	20	10	5	650	vorne nach hinten	rechts nach links
2.	440	20	300	5	650	vorne nach hinten	rechts nach links
3.	850	500	10	68	650	vorne nach hinten	rechts nach links
4.	20	500	300	130	650	vorne nach hinten	rechts nach links
5.	850	500	300	5	710	vorne nach hinten	rechts nach links
6.	850	20	10	5	780	vorne nach hinten	rechts nach links
7.	20	20	155	130	780	vorne nach hinten	rechts nach links
8.	20	500	10	5	900	vorne nach hinten	rechts nach links
9.	850	260	10	68	900	vorne nach hinten	rechts nach links
10.	850	20	300	130	900	vorne nach hinten	rechts nach links
11.	20	260	300	130	900	vorne nach hinten	rechts nach links
12.	20	260	155	5	650	hinten nach vorne	rechts nach links
13.	850	20	10	130	650	hinten nach vorne	rechts nach links
14.	850	500	300	130	650	hinten nach vorne	rechts nach links
15.	20	20	300	68	710	hinten nach vorne	rechts nach links
16.	440	500	10	5	780	hinten nach vorne	rechts nach links
17.	20	500	10	130	840	hinten nach vorne	rechts nach links
18.	850	500	155	130	840	hinten nach vorne	rechts nach links
19.	440	260	155	5	900	hinten nach vorne	rechts nach links
20.	850	20	300	5	900	hinten nach vorne	rechts nach links
21.	440	500	300	68	900	hinten nach vorne	rechts nach links
22.	20	20	10	130	900	hinten nach vorne	rechts nach links
23.	850	20	300	5	650	vorne nach hinten	links nach rechts
24.	20	500	10	130	650	vorne nach hinten	links nach rechts
25.	440	260	10	130	710	vorne nach hinten	links nach rechts
26.	20	500	300	5	780	vorne nach hinten	links nach rechts
27.	440	20	155	68	840	vorne nach hinten	links nach rechts
28.	20	20	10	5	900	vorne nach hinten	links nach rechts
29.	850	500	300	5	900	vorne nach hinten	links nach rechts
30.	850	500	10	130	900	vorne nach hinten	links nach rechts
31.	850	500	10	5	650	hinten nach vorne	links nach rechts
32.	20	500	300	5	650	hinten nach vorne	links nach rechts
33.	850	20	155	68	650	hinten nach vorne	links nach rechts
34.	20	20	300	130	650	hinten nach vorne	links nach rechts
35.	20	260	10	68	780	hinten nach vorne	links nach rechts
36.	850	260	300	130	780	hinten nach vorne	links nach rechts
37.	850	20	10	5	840	hinten nach vorne	links nach rechts
38.	20	20	300	5	900	hinten nach vorne	links nach rechts
39.	440	20	10	130	900	hinten nach vorne	links nach rechts
40.	20	500	300	130	900	hinten nach vorne	links nach rechts

Tabelle B.1 Teilversuche der ersten Testkampagne

Stützstellen der Einflussgrößen der ersten Testkampagne

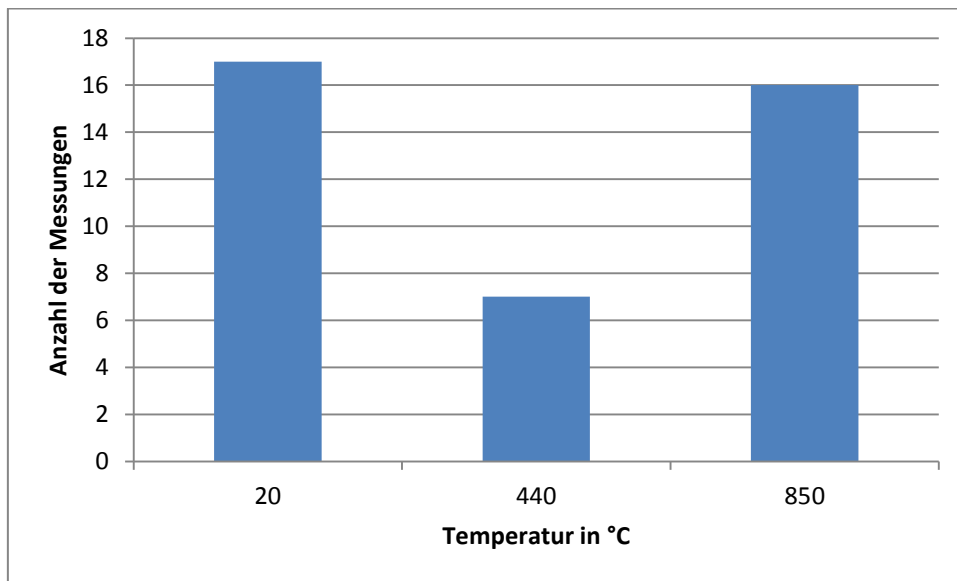


Abbildung B.1 Stützstellen der Temperatur des Luftstroms

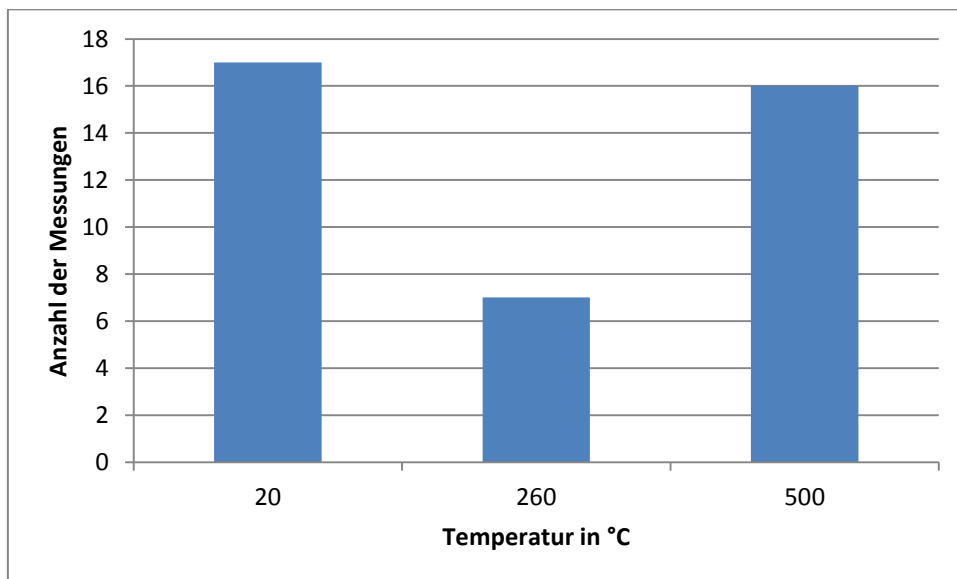


Abbildung B.2 Stützstellen der Temperatur des Methanstroms

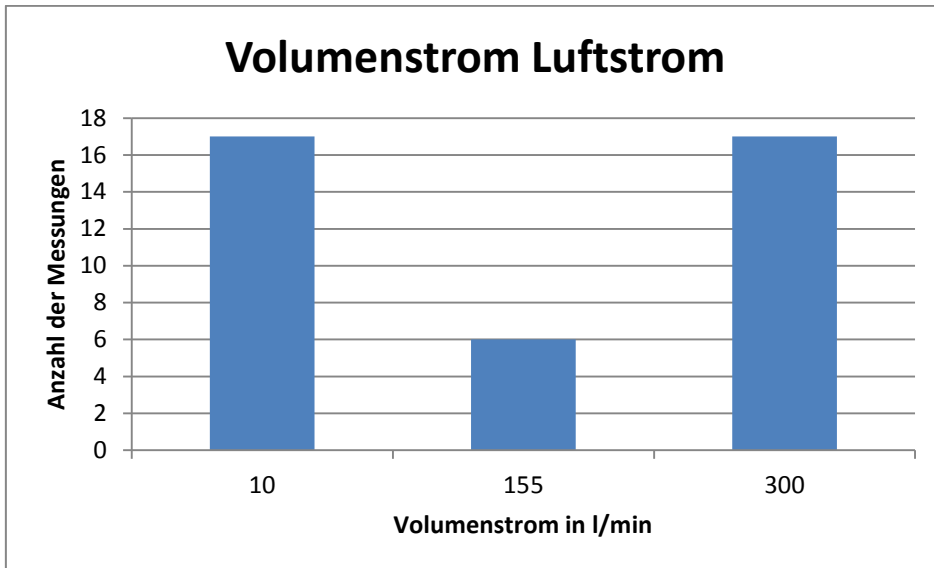


Abbildung B.3 Stützstellen des Volumenstroms des Luftstroms

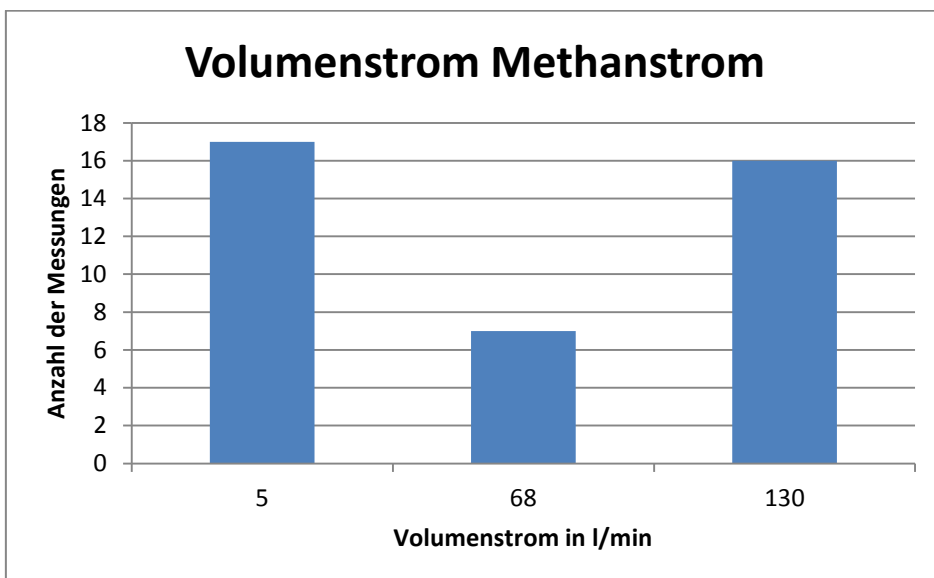


Abbildung B.4 Stützstellen des Volumenstroms des Methanstroms

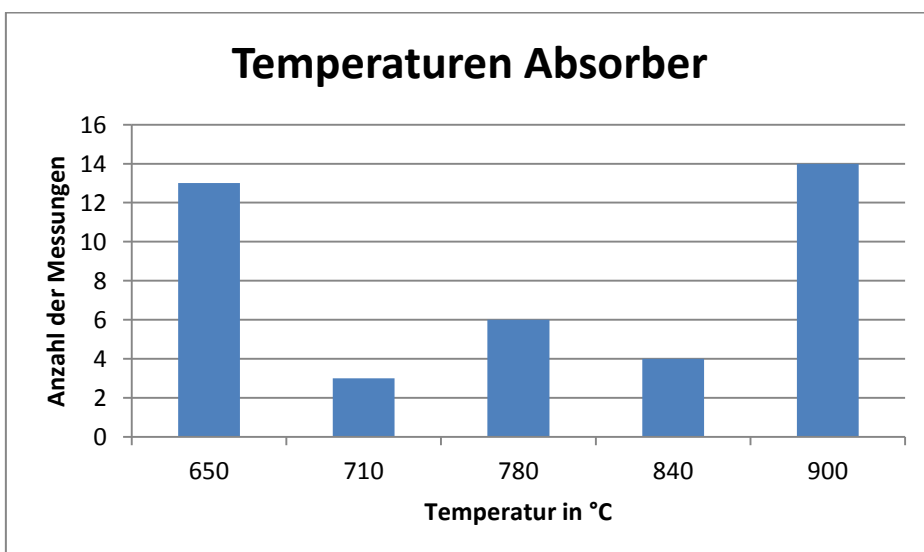


Abbildung B.5 Stützstellen der Temperatur des Absorbers

Erklärung zur Bachelor-Thesis

„Ich versichere hiermit, die von mir vorgelegte Arbeit selbstständig verfasst zu haben. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder nicht veröffentlichten Arbeiten anderer entnommen sind, habe ich als entnommen kenntlich gemacht. Sämtliche Quellen und Hilfsmittel, die ich für die Arbeit benutzt habe, sind angegeben. Die Arbeit hat mit gleichem Inhalt bzw. in wesentlichen Teilen noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen.“

Mir ist bewusst, dass sich die Hochschule vorbehält, meine Arbeit auf plagiierte Inhalte hin zu überprüfen und dass das Auffinden von plagiierten Inhalten zur Nichtigkeit der Arbeit, zur Aberkennung des Abschlusses und zur Exmatrikulation führen kann.“

Ort, Datum

Unterschrift

